

MINISTÈRE DE L'HABITAT, DE L'URBANISME ET DE LA VILLE

DTR

document
technique
réglementaire

C 2-47

**Règlement
Neige & Vent
(version 2013)**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'HABITAT, DE L'URBANISME ET DE LA VILLE

Document Technique Réglementaire
(D.T.R. C 2-4.7)

Règlement Neige & Vent (version 2013)

Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment

ISBN : 978-9961-845-47-9
Dépôt légal : 1936-2014

COMPOSANTE DU GROUPE TECHNIQUE SPECIALISE

Chargé de la révision du DTR Règlement NEIGE ET VENT RNV 99

Président :

M. NASRI Kamal

Sous-Directeur des techniques de la construction, Ministère de l'habitat et de l'Urbanisme

Vice-président :

M. KDROUSSI Belkacem

Ingénieur – expert, CTC Ouest

Rapporteur :

M. HAKIMI Laabed

Chargé de recherche, CNERIB

Membres :

M. AIT MESSAOUD Abderrahmane
M. ALLAOUA Rachid
M. BENFERDJALLAH Djelloul
M. Bensaibi Mahmoud
M. BOUKHALED Ahmed
M. HASNI Youcef
M. KACIMI Kamel
M. KADRI Toufik
M^{elle}. KERKOUR Lamia
M. NAILI Mounir
M. OULD AMARA Arezki
M. SAKHRAOUI Said
Melle. SOUDANI Kheddoudja

Ingénieur Conseil, ICIRS
Ingénieur principal, CTC Chlef
Ingénieur, CETIM
Professeur, Univ. Sâad Dahlab (Blida)
Maître de Conférences A, USTHB
Ingénieur, CTC Centre
Ingénieur, CTC Sud
Ingénieur, BEREGL
Ingénieur, CTC Est
Maître de recherche A, CGS
Ingénieur, ANRH
Chargé de recherche, CNERIB
CTTP, Ingénieur

قرار مؤرخ في 7 شعبان عام 1434 الموافق لـ 16 يونيو سنة 2013، يتضمن المصادقة على الوثيقة التقنية التنظيمية - المتعلقة بـ "نظام الثلوج والرياح «ن.ث.ر/ طبعة 2013»".

ان وزير السكن والعمان،

- بمقتضى المرسوم رقم 213-86 المؤرخ في 13 دي الحجة عام 1406 الموافق لـ 19 غشت سنة 1986 والمتضمن إنشاء لجنة تقنية دائمة للرقابة التقنية للبناء،
- وبمقتضى المرسوم الرئاسي رقم 326-12 المؤرخ في 17 شوال عام 1433 الموافق 4 سبتمبر سنة 2012 والمتضمن تعيين أعضاء الحكومة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 443-03 المؤرخ في 5 شوال عام 1424 الموافق لـ 29 نوفمبر سنة 2003 الذي يعدل ويتم المرسوم رقم 319-82 المؤرخ في 6 محرم عام 1403 الموافق لـ 23 أكتوبر سنة 1982 والمتضمن جعل المعهد الوطني للدراسات والابحاث المتعلقة بالبناء مركزاً وطنياً للدراسات والابحاث المتكاملة للبناء،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 189-08 المؤرخ في 27 جمادي الثانية عام 1429 الموافق لـ أول يوليو سنة 2008 الذي يحدد صلاحيات وزير السكن والعمان،

يقرر ما يأتي:

المادة الأولى : يصادق على الوثيقة التقنية التنظيمية - DTR C 2.4.7- المتعلقة بـ "نظام الثلوج والرياح «ن.ث.ر/ طبعة 2013» الملحة بأصل هذا القرار.

المادة 2 : تطبق أحكام الوثيقة التقنية التنظيمية المذكورة في المادة الأولى أعلاه، على كل دراسة جديدة لمشروع بناية بعد ثلاثة (3) أشهر من تاريخ نشر هذا القرار في الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.

المادة 3 : على أصحاب المشاريع والمستشارين الفنيين ومكاتب الدراسات التقنية، ومؤسسات الإنجاز وهيئات المراقبة التقنية للبناء ومكاتب الخبرة التقنية، احترام أحكام الوثيقة التقنية التنظيمية المذكورة أعلاه.

المادة 4 : يكلف المركز الوطني للدراسات والابحاث المتكاملة للبناء بطبع وتوزيع الوثيقة التقنية التنظيمية، موضوع هذا القرار.

المادة 5 : يلغى القرار المؤرخ في 12 ربيع الثاني عام 1420 الموافق 25 يقليه سنة 1999 والمتضمن المصادقة على الوثيقة التقنية التنظيمية المتعلقة بنظام الثلوج والرياح ن.ث.ر.1999.

المادة 6 : ينشر هذا القرار في الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.

حرر بالجزائر في 7 شعبان عام 1434

الموافق 16 يونيو سنة 2013.

عبد المجيد تبون

**ARRETE MINISTERIEL PORTANT APPROBATION DU
DOCUMENT TECHNIQUE REGLEMENTAIRE C 2.47**

“ REGLEMENT NEIGE ET VENT « RNV/Version 2013 »”

Le Ministre de l'Habitat et de l'Urbanisme

- Vu le décret n° 86-213 du 13 Dhoul El Hidja 1406 correspondant au 19 Août 1986 portant création d'une commission technique permanente pour le contrôle technique de la construction ;
- Vu le décret présidentiel n° 12-326 du 17 Chaoual 1433 correspondant au 4 septembre 2012 portant nomination des membres du gouvernement ;
- Vu le décret exécutif n° 03-443 du 5 Chaoual 1424 correspondant au 29 novembre 2003, modifiant et complétant le décret n° 82-319 du 23 Octobre 1982, portant transformation de l'Institut National d'Etudes et de Recherches du Bâtiment (INERBA) en Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) ;
- Vu le décret exécutif n° 08-189 du 27 Jounada Ethania 1429 correspondant au 01 juillet 2008 fixant les attributions du ministre de l'habitat et de l'urbanisme ;

ARRETE,

ARTICLE 01 - Est approuvé le document technique réglementaire D.T.R C 2.4.7 intitulé
“ REGLEMENT NEIGE ET VENT « RNV/Version 2013 »”
annexé à l'original du présent arrêté ;

ARTICLE 02 - Les dispositions du document technique réglementaire, visé à l'article 1er ci-dessus, sont applicables à toute nouvelle étude de projet de construction, trois (3) mois après la date de publication du présent arrêté au Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire ;

ARTICLE 03 - Les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'oeuvres, les bureaux d'études techniques, les entreprises de réalisation, les organismes de contrôle technique de la construction et les bureaux d'expertises techniques sont tenus de respecter les dispositions du document technique réglementaire suscité ;

ARTICLE 04 - Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), est chargé de l'édition et de la diffusion du présent document technique réglementaire, objet du présent arrêté ;

ARTICLE 05 - L'arrêté du 12 Rabie Ethani 1420 correspondant au 25 juillet 1999 portant approbation du document technique réglementaire portant sur le règlement neige et vent RNV 99 est abrogé ;

ARTICLE 06 - Le présent arrêté sera publié au Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire.

*Fait à Alger, le 7 Châabane 1434
correspondant au 16 juin 2013*

Abdelmadjid TEBBOUNE

PRÉAMBULE

Le présent règlement, élaboré sous l'égide de la Commission Technique Permanente pour le contrôle technique (CTP), est une révision du DTR C-2-47 portant sur les « règles neige et vent – RNV 99 – approuvé en 1999.

Cette nouvelle version s'est avérée nécessaire après dix (10) années de pratique au cours desquelles des remarques et propositions ont été émises par les différents utilisateurs représentant en général des bureaux d'études, des organismes de contrôle et des institutions de l'enseignement supérieur.

Cette actualisation a porté notamment sur les points suivants :

- Révision du zonage climatique des vitesses de vent tenant compte des enregistrements récents ;
- Actualisation des valeurs des coefficients de pression de certains ouvrages sur la base des récentes recherches ;
- Reprise de l'approche de détermination des coefficients de force des structures en treillis et définition d'une méthodologie de prise en compte des équipements fixés sur les pylônes ;
- Insertions de plusieurs tableaux et graphiques pour faciliter la détermination de certains paramètres ;
- Élargissement du domaine d'application du règlement à d'autres formes d'ouvrages (murs de clôture, panneaux de signalisation, drapeaux...) ;
- Révision de certaines valeurs des coefficients de formes des toitures pour la détermination de la charge de neige ;
- Introduction d'une annexe informative sur les essais en soufflerie et la réponse des structures ;
- Reprise de l'approche didactique pour l'utilisation du règlement.

Les valeurs des actions de neige, de sable et de vent, définies dans ce DTR sont des valeurs caractéristiques et il convient de les utiliser en combinaison avec les règlements de calcul basés sur les mêmes concepts, (calcul aux états limites).

Ce règlement est accompagné par des exemples d'application traitant la détermination de l'action du vent. Ils peuvent constituer un guide et support didactique pour les praticiens ainsi que pour d'autres utilisateurs de ce DTR. Ces exemples ont porté sur l'étude des cas suivants :

- Cas d'un bâtiment tour ;
- Cas d'un hangar industriel ;
- Cas d'un panneau de signalisation ;
- Cas d'un château d'eau et enfin ;
- Cas d'une structure de pylône.

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	9
PARTIE I ACTIONS DE LA NEIGE.....	15
SYMBOLES POUR LA PARTIE I	17
1. OBJET.....	18
2. DOMAINE D'APPLICATION.....	18
3. CALCUL DES CHARGES DE NEIGE	18
3.1 CHARGE DE NEIGE SUR LES TOITURES OU AUTRES SURFACES	18
3.2. NEIGE SUSPENDUE EN DÉBORD DE TOITURE	19
3.3. CHARGE DE NEIGE SUR LES OBSTACLES	20
4. CHARGE DE NEIGE SUR LE SOL	21
5. AUTRES VALEURS REPRESENTATIVES.....	23
6. COEFFICIENTS DE FORME DES TOITURES.....	23
6.1. CAS DE CHARGES.....	23
6.2. TOITURES EN PENTES	23
6.2.1. <i>Toitures à un versant.....</i>	23
6.2.2. <i>Toitures à deux versants</i>	24
6.2.3. <i>Toitures à versants multiples (angle de pente inférieur à 60°).....</i>	26
6.2.4. <i>Toitures à redans (en sheds)</i>	27
6.3. TOITURES CYLINDRIQUES	28
6.4. TOITURES PRÉSENTANT DES DISCONTINUITÉS DE NIVEAUX MARQUÉES	28
6.5. ACCUMULATION AU DROIT DES SAILLIES ET OBSTACLES.....	30
7. CHARGES DE SABLE DANS LA ZONE D.....	31
7.1. DÉFINITION DE LA CHARGE	31
7.2. ACTION DE LA CHARGE DE SABLE	31
7.2.1. <i>Toitures plates ou à faibles pentes.....</i>	31
7.2.2. <i>Toitures rampantes</i>	31
ANNEXE 1 : ZONES DE NEIGE PAR COMMUNE.....	36
CARTE DE ZONES NEIGE.....	41
PARTIE II ACTIONS DU VENT.....	43
SYMBOLES POUR LA PARTIE II	44
CHAPITRE 1 NOTIONS GENERALES	47
1.1. OBJET	47
1.2. DOMAINE D'APPLICATION	47
1.3. TERMES ASSOCIÉS À LA VITESSE DU VENT.....	48
1.4. PRINCIPES GÉNÉRAUX.....	48
1.4.1. <i>Modélisation de l'action du vent.....</i>	48
1.4.2. <i>Autres valeurs représentatives</i>	48
CHAPITRE 2 BASES DE CALCUL.....	49
2.1. DIRECTION DU VENT	49
2.2. PROCÉDURES DE CALCUL.....	49
2.3. PRESSION DYNAMIQUE DE POINTE	50
2.3.1. FORMULE DE CALCUL	50
2.3.2. HAUTEUR DE RÉFÉRENCE z_e	50

2.4. COEFFICIENT D'EXPOSITION	51
2.4.1. <i>Définitions</i>	51
2.4.2. <i>Formule de calcul</i>	51
2.4.3. <i>Catégories de terrain</i>	52
2.4.4. <i>Coefficient de rugosité</i>	53
2.4.5. <i>Coefficient de topographie</i>	54
2.4.6. <i>Intensité de turbulence</i>	57
2.5. CALCUL DE LA PRESSION DUE AU VENT	57
2.5.1. <i>Hypothèses et conventions</i>	57
2.5.2. <i>Détermination de la pression aérodynamique</i>	58
2.6. ACTIONS D'ENSEMBLE	58
2.6.1. <i>Calcul des forces à l'aide des coefficients de forces</i>	58
2.6.2. <i>Calcul des forces à l'aide des pressions de surfaces</i>	58
2.6.3. <i>Effets du frottement</i>	59
2.6.4. <i>Aire de frottement</i>	60
2.6.5. <i>Prise en compte de l'effet de torsion</i>	61
CHAPITRE 3 COEFFICIENT DYNAMIQUE	62
3.1. DÉFINITION ET PRINCIPES DE DÉTERMINATION DE C_D	62
3.2. VALEUR SIMPLIFIÉE	62
3.3. FORMULE GÉNÉRALE	62
3.3.1. <i>Partie quasi-statique</i>	63
3.3.2. <i>Partie résonnante</i>	64
3.3.3. <i>Facteur de pointe</i>	67
3.3.4. <i>Fréquence fondamentale</i>	67
CHAPITRE 4 COEFFICIENTS DE FORCE	69
4.1. FORMULE GÉNÉRALE	69
4.1.1. <i>Facteur d'élançement</i>	69
4.1.2. <i>Élançement effectif λ_e</i>	70
4.2. CONSTRUCTION ET ÉLÉMENTS STRUCTURAUX À SECTION RECTANGULAIRE	72
4.3. CONSTRUCTIONS ET ÉLÉMENTS STRUCTURAUX À BASE POLYGONALE RÉGULIÈRE	73
4.4. CONSTRUCTIONS ET ÉLÉMENTS STRUCTURAUX À BASE CIRCULAIRE	74
4.5. STRUCTURES EN TREILLIS	75
4.6. PROFILÉS À ANGLE VIFS	77
4.7. CAS DES STRUCTURES EN FORME DE SPHÈRE	77
4.8. CAS DES DRAPEAUX	79
CHAPITRE 5 COEFFICIENTS DE PRESSION	80
5.1. COEFFICIENTS DE PRESSION EXTÉRIEURE	80
5.1.1. <i>Constructions à base rectangulaire</i>	80
5.1.2. <i>Parois verticales</i>	80
5.1.3. <i>Toitures plates</i>	81
5.1.4. <i>Toitures inclinées à un versant</i>	82
5.1.5. <i>Toitures à deux versants</i>	86
5.1.6. <i>Toitures à quatre versants</i>	88
5.1.7. <i>Toitures à redans (shed)</i>	90
5.1.8. <i>Toitures à versants multiples</i>	90
5.1.9. <i>Toitures en forme de voûte</i>	91
5.1.10. <i>Avancées de toits et débords</i>	92
5.1.11. <i>Parois verticales des constructions à base circulaire</i>	92
5.1.12. <i>Toiture en forme de sphère ou de calotte sphérique</i>	95
5.2. COEFFICIENTS DE PRESSION INTÉRIEURE	96
5.2.1. <i>Principes et définitions</i>	96
5.2.2. <i>Valeurs de C_{pi}</i>	96

5.3. COEFFICIENTS POUR LES TOITURES ISOLÉES	97
5.3.1. <i>Principes et définitions</i>	97
5.3.2. <i>Valeurs des coefficients de pression</i>	100
5.4. ÉLÉMENTS EN RELIEF ET DISCONTINUITÉS	102
5.4.1. <i>Éléments en relief</i>	102
5.4.2. <i>Toitures avec discontinuités</i>	103
5.5. CAS DES MURS ISOLÉS, ET PANNEAUX DE SIGNALISATION	104
ANNEXE 1 : ZONES DE VENT	107
ANNEXE 2 : VITESSE MOYENNE DU VENT	111
ANNEXE 3 : EXCITATION PAR LE DÉTACHEMENT TOURBILLONNAIRE	112
1. GÉNÉRALITÉS	112
2. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE PHYSIQUE	112
3. CRITÈRES DE SENSIBILITÉ AU DÉTACHEMENT TOURBILLONNAIRE	112
4. VITESSE CRITIQUE	113
5. ACTION DUE AU DÉTACHEMENT TOURBILLONNAIRE	114
6. PARAMÈTRES POUR LE CALCUL DES ACTIONS DUES AU DÉTACHEMENT TOURBILLONNAIRE	115
6.1. <i>Coefficients de longueur de corrélation effective et de déformée modale</i>	115
6.2. <i>Coefficient d'excitation aérodynamique</i>	115
6.3. <i>Nombre de Scruton</i>	115
ANNEXE 4 : ILLUSTRATIONS DES CATEGORIES DE TERRAINS	118
ANNEXE 5 : SOUFFLÉRIES AÉRODYNAMIQUES	122
1. INTRODUCTION	122
2. DÉFINITION	122
3. CONDITIONS DE SIMILITUDE ET RESTRICTIONS ASSOCIÉES	122
4. TYPES DE SOUFFLÉRIES	122
5. SOUFFLÉRIES À BASSE VITESSE ET SUBSONIQUES	123
6. DOMAINE D'APPLICATION	124
7. CONDITIONS D'ESSAIS	125
8. RÉPONSE DYNAMIQUE	125
9. EFFETS DES CHARGES	125
9.1. <i>Durée d'occurrence des effets de charges</i>	125
9.2. <i>Limitations des vitesses de vent</i>	126
9.3. <i>Limitations des charges</i>	126

PARTIE I

ACTIONS DE LA NEIGE

SYMBOLES POUR LA PARTIE I

b, h et l (m) :	longueurs
l_s (m) :	longueur de congère
q_1, q_2 (kN/ml) :	surcharges de sable
F_s (en kN/m) :	force due au glissement d'une masse de neige
S (en kN/m ²) :	charge caractéristique de neige
S_k (en kN/m ²) :	charge de neige sur le sol
S_e (en kN/m) :	charge de neige suspendue par unité de longueur
α (en degrés) :	angle caractérisant le versant d'une toiture
β (en degrés) :	angle de la tangente à la courbure d'une toiture cylindrique sur l'horizontale
μ :	coefficient de forme de la charge de neige
μ_i :	coefficient de forme correspondant au versant i
μ_s :	coefficient de forme de la charge de neige due au glissement
μ_w :	coefficient de forme de la charge de neige due au vent
γ (en kN/m ³) :	poids volumique de la neige
ψ_0, ψ_1, ψ_2 :	coefficients de combinaison
k :	coefficient prenant en compte l'irrégularité de forme de la charge de neige

1. OBJET

1.1. Le présent règlement a pour objet de définir les valeurs représentatives de la charge statique de neige sur toute surface située au-dessus du sol et soumise à l'accumulation de la neige et notamment sur les toitures.

Il fixe, par ailleurs, la charge nominale de sable à prendre en compte sur les toitures des constructions implantées dans la zone D d'après la carte sable de l'Algérie.

On entend par valeur représentative d'une action la valeur utilisée pour la vérification d'un état limite.

1.2. Le présent règlement ne fournit pas de règles sur :

- les chocs dus aux charges de neige glissant ou tombant d'une toiture plus élevée ;
- les charges consécutives à un engorgement, par la neige ou la glace, des dispositifs d'évacuation des eaux pluviales ;
- les charges complémentaires dues au vent du fait de la modification de la forme ou de dimension de bâtiment résultant de la présence de neige ou la formation de glace ;
- les charges dans les zones où la neige est présente toute l'année ;
- les charges de glace ;
- les poussées latérales de la neige, exercées par exemple par les congères (une congère est un amas de neige entassé par le vent) ;
- l'amplification de la charge consécutive à une chute de pluie importante sur la neige.

2. DOMAINE D'APPLICATION

2.1. Le présent règlement s'applique à l'ensemble des constructions en Algérie situées à une altitude inférieure ou égale à 2000 m.

2.2. Il ne s'applique pas aux sites d'une altitude supérieure à 2000m, pour lesquels le cahier des charges doit fixer les valeurs à prendre en compte.

3. CALCUL DES CHARGES DE NEIGE

3.1 Charge de neige sur les toitures ou autres surfaces

3.1.1. La charge caractéristique de neige S par unité de surface en projection horizontale de toitures ou de toute autre surface soumise à l'accumulation de la neige s'obtient par la formule suivante :

$$S = \mu \cdot S_k \quad [kN/m^2] \quad (1)$$

Où :

- S_k (en kN/m^2) est la charge de neige sur le sol, donnée au paragraphe 4, fonction de l'altitude et de la zone de neige (Cf. annexe 1) ;
- μ est un coefficient d'ajustement des charges, fonction de la forme de la toiture, appelé coefficient de forme et donné au paragraphe 6.

La neige peut se déposer sur la toiture de nombreuses manières selon :

- la disposition géométrique du bâtiment, la nature des matériaux, l'isolation thermique, les singularités de la toiture ;
- l'environnement climatique : durée de la saison de neige, ensoleillement, fonte de

- la neige et regel, vent ;
- la topographie locale et, en particulier, les conditions d'abri dues aux bâtiments, aux arbres ; etc.
- les actions particulières telles que l'enlèvement de la neige par les usagers.

Parmi tous ces facteurs le plus important est la géométrie de la toiture et le vent ; néanmoins, une réduction de la charge de neige peut être apportée en tenant compte de l'effet d'exposition et de l'isolation thermique à condition que le concepteur puisse fournir des justifications nécessaires acceptées par le maître d'ouvrage.

3.2. Neige suspendue en débord de toiture

3.2.1. Dans les constructions situées à plus de 1000m d'altitude, Le calcul des parties de toiture en débord des murs de façade doit tenir compte de la neige suspendue en rive, en plus de la charge de neige appliquée à cette partie de toiture.

3.2.2. Les charges suspendues sont supposées être appliquées au bord de la toiture et se déterminent comme suit :

$$S_e = \frac{k \cdot S^2}{\gamma} \quad [\text{kN/m}] \quad (2)$$

Où :

- S_e (en kN/m) est la charge de neige suspendue, par mètre linéaire ;
- S (en kN/m²) est la charge de neige pour le cas de charge non accumulée le plus sévère pour la toiture considérée (Cf. § 4) ;
- k est un coefficient prenant en compte l'irrégularité de forme de la neige; il doit être pris égal à 2.5 ;
- γ (en kN/m³) est le poids volumique de la neige qui, pour ce calcul, doit être pris égal à 3 kN/m³.

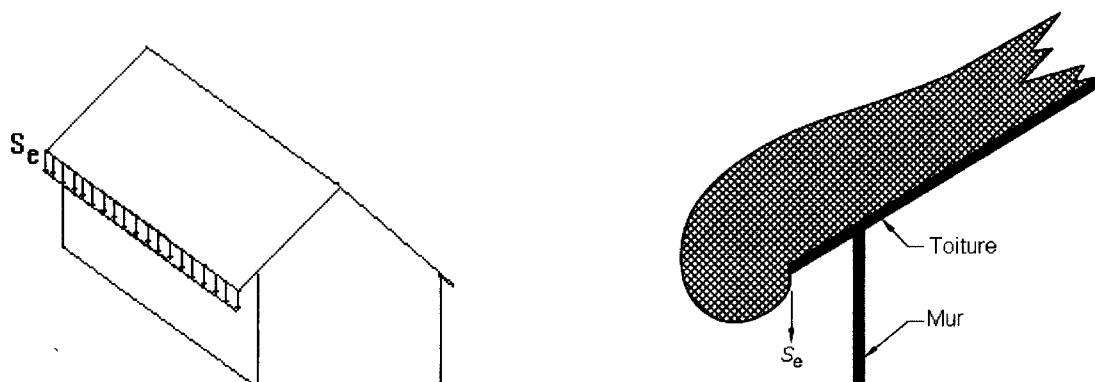


Figure 1 : Neige suspendue en débord de toiture

3.3. Charge de neige sur les obstacles

3.3.1. Les obstacles tels que cheminées, barrière à neige, garde-corps, acrotères ou autres doivent être vérifiés sous l'action d'une force F_s due au glissement d'une masse de neige sur la toiture.

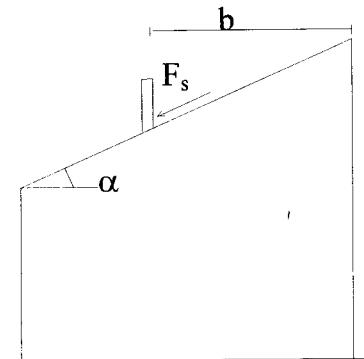


Figure 2. : Force exercée sur les obstacles

3.3.2. Cette force F_s exercée dans la direction de ce glissement par unité de largeur est donnée par la formule suivante :

$$F_s = S.b.\sin\alpha \quad [\text{kN/m}] \quad (3)$$

Où :

- S (en kN/m^2) est la charge de neige sur la toiture dans le cas de charge sans accumulation et le plus lourd correspondant à la surface de la toiture dont la neige pourrait glisser (Cf. §3.1) ;
- b (en m) est la distance, mesurée horizontalement, entre la barre à neige ou l'obstacle et la barre suivante ou le faîte de la toiture ;
- α (en degré) est l'angle du versant de la toiture.

La force F_s ci-dessus est donnée dans l'hypothèse d'un coefficient de frottement entre la neige et la toiture égal à zéro.

4. CHARGE DE NEIGE SUR LE SOL

La charge caractéristique de neige sur le sol S_k par unité de surface est fonction de la localisation géographique et de l'altitude du lieu considéré.

Une exploitation statistique des hauteurs maximales annuelles de neige observées en une journée a permis de calculer les hauteurs de neige pendant une période de retour de 50 ans. La détermination des charges de neige au sol à partir des hauteurs calculées a été obtenue en prenant un poids volumique de neige égale à 1 kN/m³.

Il est à noter que la masse volumique de la neige est variable. Généralement elle augmente avec la durée d'exposition de la neige et dépend de la localisation du site, de son climat et de son altitude. D'autres valeurs ont été spécifiées dans le présent DTR. (Cf. 3.2.2, §6.4.2)

L'annexe I donne la zone à considérer pour chaque commune du pays.

La valeur de S_k en kN/m² est déterminée par les lois de variation suivantes en fonction de l'altitude H (par rapport au niveau de la mer) en m du site considéré et représentées graphiquement sur la figure 3.

Zone A
$$S_k = \frac{0.07 \cdot H + 15}{100}$$

Zone B
$$S_k = \frac{0.04 \cdot H + 10}{100}$$

Zone C
$$S_k = \frac{0.0325 \cdot H}{100}$$

Zone D pas de charge de neige. Dans cette région, une charge représentant l'ensablement des terrasses, telle que définie au paragraphe 7, sera prise en compte.

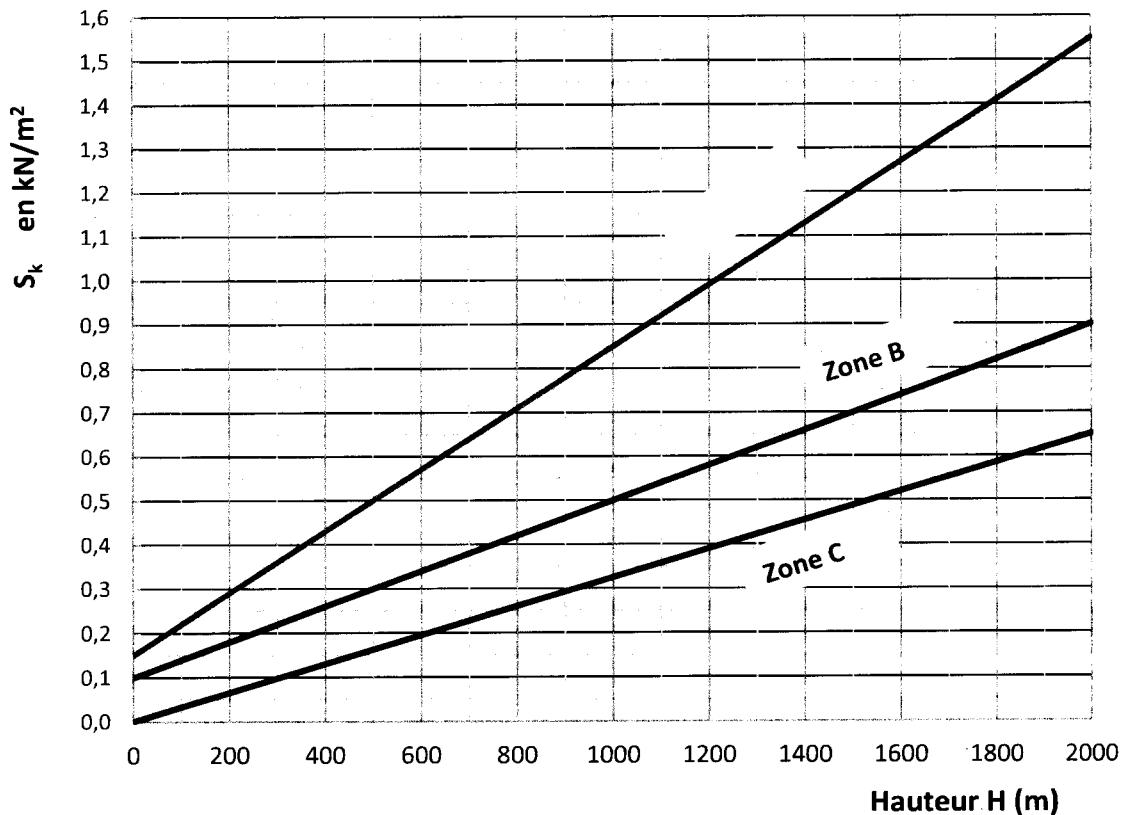


Figure 3 : Charges de neige (kN/m^2) en fonction de l'altitude $H(m)$ et du zonage

5. AUTRES VALEURS REPRESENTATIVES

Outre la valeur caractéristique qui est la principale valeur représentative, les autres valeurs représentatives entrant dans les différentes combinaisons d'actions sont définies comme suit :

- La valeur de combinaison égale à $\psi_0.S_k$ avec $\psi_0 = 0.6$;
- La valeur fréquente égale à $\psi_1.S_k$, avec $\psi_1 = 0.2$;
- La valeur quasi-permanente égale à $\psi_2.S_k$.avec $\psi_2 = 0$.

Les combinaisons fréquentes et les combinaisons, quasi-permanentes concernent essentiellement des constructions en béton précontraint.

6. COEFFICIENTS DE FORME DES TOITURES

Les valeurs des coefficients μ données ci-après concernent les toitures de formes courantes. Pour des formes particulières de toitures, le cahier des charges doit préciser la valeur à prendre en compte.

6.1. Cas de charges

Pour le calcul des coefficients de forme des toitures, il sera tenu compte des cas de charges ci-dessous :

- Cas de charge répartie sur toute la surface ;
- Cas de charge non uniforme : distribution initiale non uniforme, accumulation localisée au droit d'un obstacle, distribution de neige affectant la répartition de la charge sur l'ensemble de la toiture, (par exemple lorsque la neige est transportée du côté au vent vers le côté sous le vent) ;
- Cas de charge résultant d'une redistribution de la neige depuis une partie du bâtiment plus élevée (par glissement) ;
- Cas de charge répartie sur une partie quelconque de la surface, et la moitié de cette valeur répartie sur le reste de cette surface, de manière à produire l'effet le plus défavorable sur l'élément considéré.

6.2. Toitures en pentes

6.2.1. Toitures à un versant

6.2.1.1. Les coefficients de forme des toitures à un versant, (figure 4) sans obstacle de retenue de la neige, (la neige est supposée pouvoir tomber librement) sont donnés par le tableau 1 ou directement lus sur la figure 5.

6.2.1.2. Dans le cas où une rive de la toiture se termine par un obstacle de retenue de la neige, tels que garde-corps, barrière à neige, ou autres, le coefficient de forme de la toiture ne peut être réduit à une valeur inférieure à 0.8.

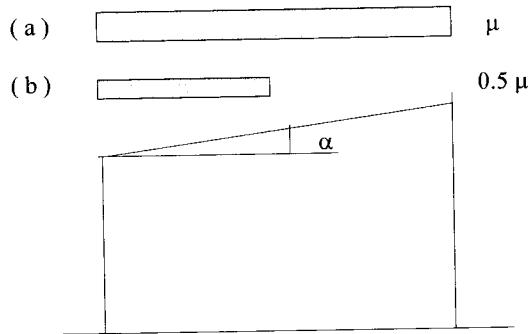


Figure 4 : Coefficient de forme - toitures à un versant

(α) angle du versant par rapport à l'horizontale (en °)	$0 \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
coefficient μ	0.8	$0.8 \left(\frac{60 - \alpha}{30} \right)$	0.0

Tableau 1: Coefficients de forme - toitures à un versant

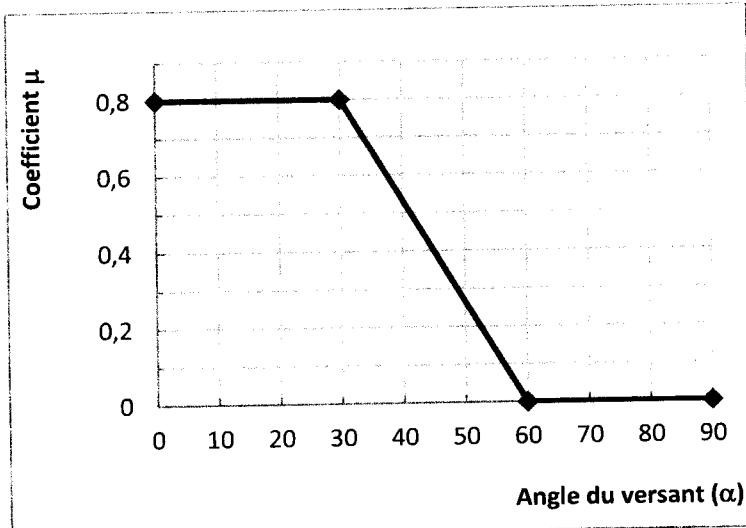


Figure 5 : coefficient de forme des toitures à 1 versant

6.2.1.3. Il convient de considérer les dispositions de charges suivantes :

- Cas de charge uniformément répartie (fig. 4, cas a) ;
- Cas de charge uniformément répartie, appliquée sur la moitié la plus défavorable de la toiture (fig. 4, cas b).

6.2.2. Toitures à deux versants

6.2.2.1. Les coefficients de forme des toitures à deux versants (fig. 6) sans obstacles de retenue sont donnés par le tableau 2 et illustrées sur la figure 7.

6.2.2.2. Dans le cas où une rive de la toiture se termine par un obstacle, tels que garde-corps, barrière à neige, ou tous autres obstacles, le coefficient de forme de la toiture ne peut être réduit à une valeur inférieure à 0.8.

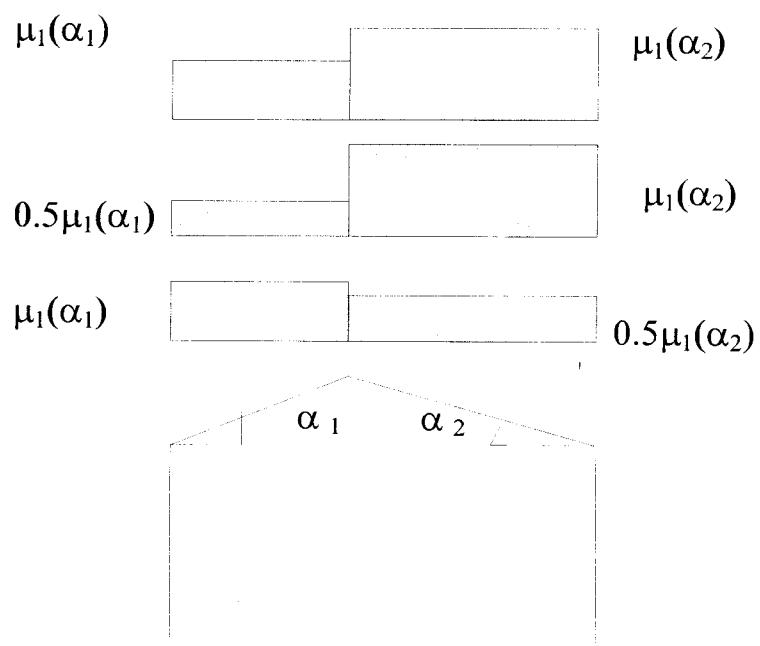


Figure 6 : Coefficient de forme - Toitures à deux versants

(α) angle du versant par rapport à l'horizontale (en $^{\circ}$)	$0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$	$30^{\circ} < \alpha < 60^{\circ}$	$\alpha \geq 60^{\circ}$
coefficient μ_1	0.8	$0.8 \cdot \left(\frac{60 - \alpha}{30} \right)$	0.0

Tableau 2 : Coefficients de forme - Toitures à deux versants

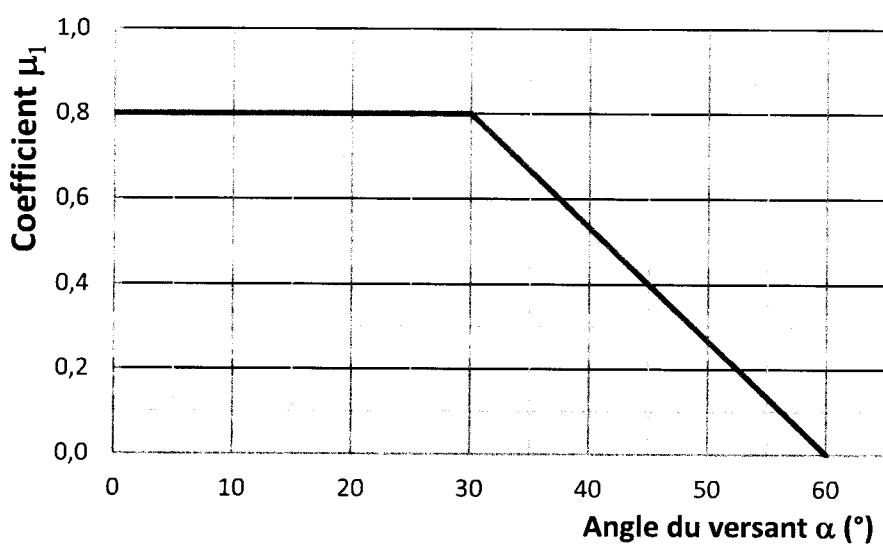


Figure 7 : Coefficients de forme - Toitures à deux versants

6.2.2.3. Les dispositions de charges à prendre en compte sont celles produisant les effets les plus défavorables parmi les cas de la figure 6.

6.2.3. Toitures à versants multiples (angle de pente inférieur à 60°)

6.2.3.1. Les coefficients de forme des toitures à versants multiples (fig. 9) sont donnés par le tableau 3 et illustrés sur la figure 8.

(α) angle du versant par rapport à l'horizontale (en °)	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
coefficient μ_1	0.8	$0.8 \left(\frac{60 - \alpha}{30} \right)$	0.0
coefficient μ_2	$0.8 + 0.8 \left(\frac{\alpha}{30} \right)$	1.6	-

Tableau 3 : Coefficients de forme - Toitures à versants multiples

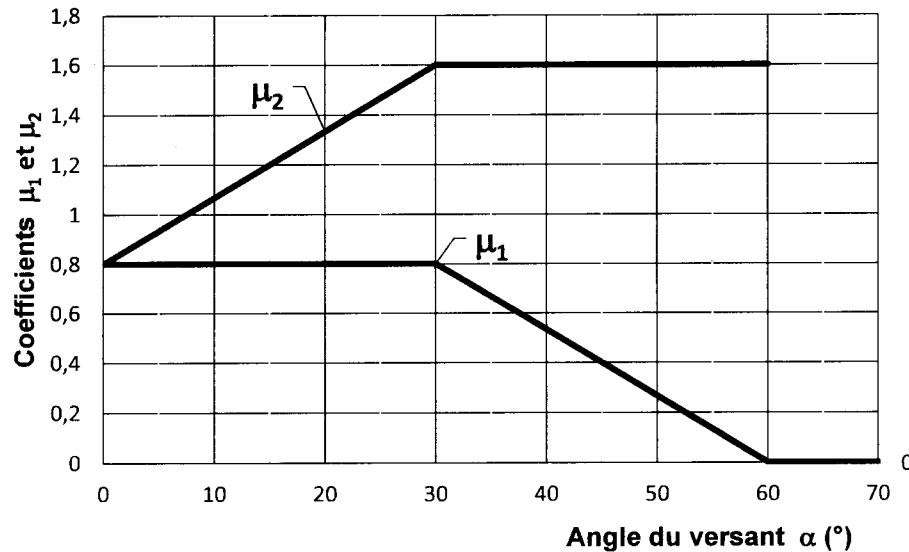


Figure 8 : Coefficients de forme - Toitures à versants multiples

6.2.3.2. Les dispositions de charge à considérer sont représentées sur la figure 9 et correspondant à :

- Cas (i) : sans accumulation de neige ;
- Cas (ii) : avec accumulation de neige.

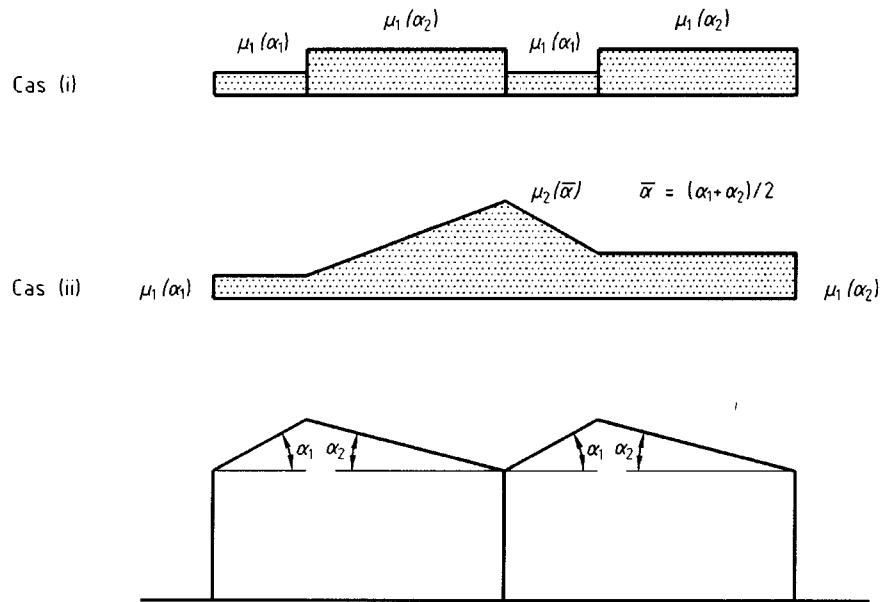


Figure 9 : Coefficients de forme - Toitures à versants multiples

6.2.4. Toitures à redans (en sheds)

6.2.4.1. Les coefficients de forme appliqués aux noues des toitures multiples lorsque l'un ou les deux versants présentent une pente supérieure à 60° (angle α_1 dans la figure 10) sont donnés par le tableau 4.

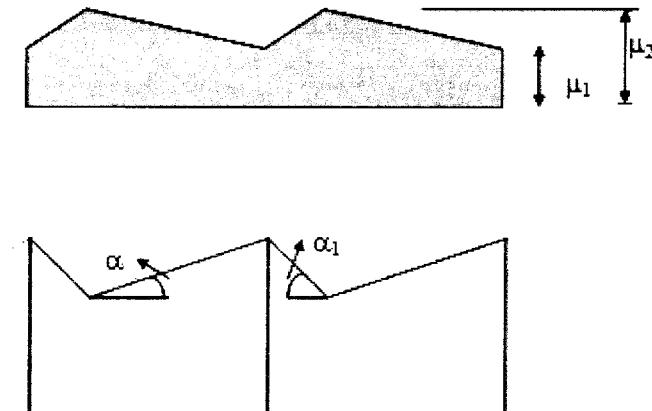


Figure 10 : Coefficient de forme des toitures à redans

(α) angle du versant par rapport à l'horizontale (en $^\circ$)	$0 \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$\alpha > 45^\circ$
coefficient de forme μ_1	0.8	$0.8 + 0.8 \left(\frac{\alpha}{30} \right)$	Une analyse particulière est à faire à partir des phénomènes de base (glissement de la neige, redistribution par le vent) pour la détermination des valeurs de μ .
coefficient de forme μ_2	$0.8 \left(\frac{60 - \alpha}{30} \right)$	1.6	

Tableau 4 : Coefficients de forme - Toitures à redans ($\alpha_1 > 60^\circ$)

6.2.4.2 Pour les versants extérieurs, les valeurs de μ sont, s'il y a lieu, celles correspondant au cas des toitures à versants multiples (§6.2.3).

6.3. Toitures cylindriques

Dans le cas de toitures cylindriques ne comportant pas d'obstacles de neige, il convient de considérer les cas de charges illustrées par la figure 11. La disposition de charge à retenir étant celle produisant les effets les plus défavorables. Les toitures cylindriques incluent toutes celles dont la courbure, uniforme ou non, n'est pas alternée.

Les coefficients de forme se calculent comme suit :

- Pour $\beta \leq 60^\circ$ $\mu_1 = 0.8$

$\mu_3 = 0.2 + 10 \frac{h}{b}$, avec la limitation $\mu_3 \leq 2.0$ (b étant la portée de la voûte ou coupole, voir figure 10)

- Pour $\beta > 60^\circ$ $\mu_1 = \mu_3 = 0$

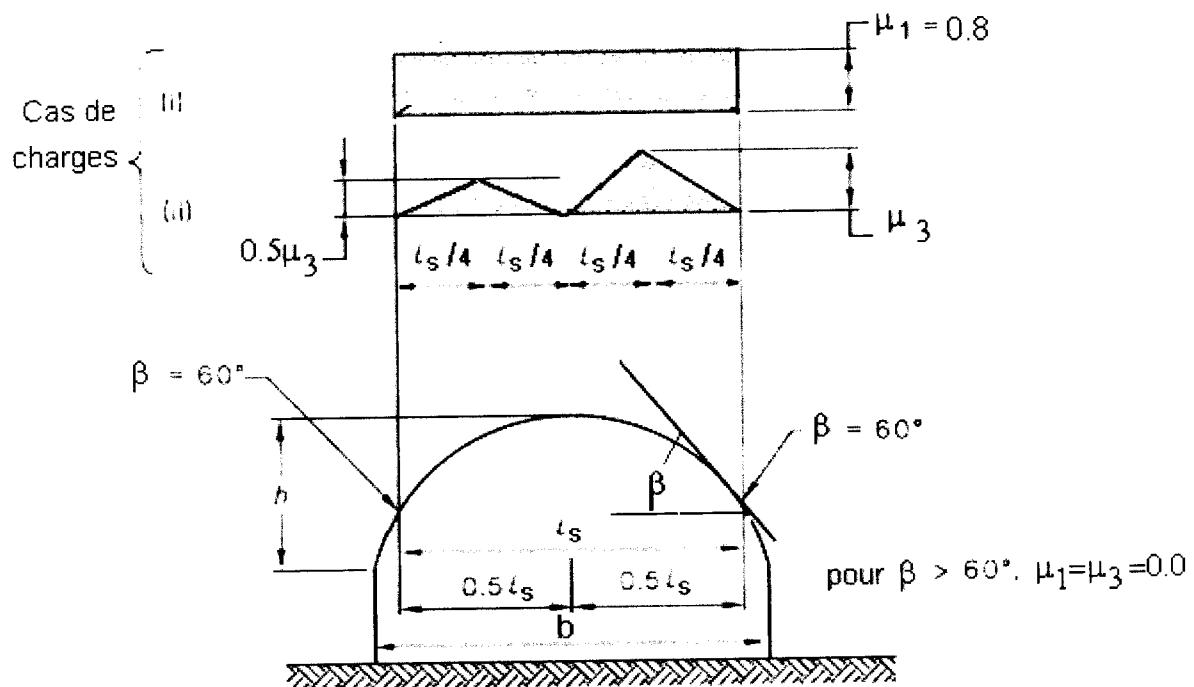


Figure 11 : Coefficients de forme - Toitures cylindriques

6.4. Toitures présentant des discontinuités de niveaux marquées

6.4.1. Dans le cas de discontinuité de niveau marquée, il faut considérer soit les charges de neige uniformes ou asymétriques décrites en 6.2, soit la charge accumulée illustrée par la figure 12. La disposition de charge à retenir étant celle produisant les effets les plus défavorables.

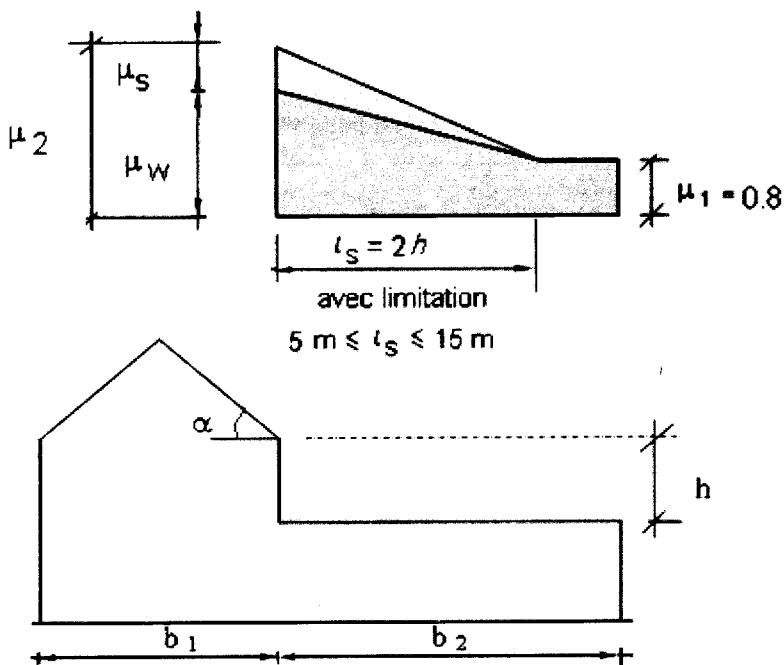


Figure 12 : Coefficients de forme - Discontinuités de niveau marquées.

6.4.2. L'accumulation de neige sur les toitures à plusieurs niveaux résulte de l'entraînement de la neige par le vent et du glissement de la neige depuis la toiture la plus élevée. Les coefficients de forme se déterminent de la manière suivante :

- $\mu_1 = 0.8$ (en supposant une toiture inférieure plate) ;
- $\mu_2 = \mu_s + \mu_w$

Où :

μ_s est le coefficient de forme de la charge de neige due au glissement. Il prend les valeurs suivantes :

- Pour $\alpha \leq 15^\circ$ $\mu_s = 0$.
- Pour $\alpha > 15^\circ$ μ_s se détermine par application d'une charge additionnelle égale à 50% de la charge de neige maximale s'exerçant sur le versant adjacent de la toiture supérieure, calculée conformément au paragraphe 6.2.

μ_w est le coefficient de forme de la charge de neige due au vent. Il prend les valeurs suivantes :

$$\mu_w = \min [(b_1 + b_2)/2.h, \gamma.h/S_k], \quad \text{avec la limitation } 0.8 \leq \mu_w \leq 4.0$$

où :

- γ (en kN/m^3) est le poids volumique de la neige ; dans ce calcul, il doit être pris égal à 2 kN/m^3 ;
- b_1 , b_2 , et h (en m) sont définis sur la figure 12 ;
- S_k (en kN/m^2) est la charge caractéristique de neige sur le sol (Cf. § 4).

La longueur de congère l_s (en m) est égale à (voir figure 12) :

$$l_s = 2h \quad \text{avec la limitation } 5 \text{ m} \leq l_s \leq 15 \text{ m.}$$

Si $b_2 < l_s$ le coefficient en rive de la toiture inférieure se détermine par interpolation entre μ_1 et μ_2 et l'extrémité de la charge de neige est tronquée à la longueur de la partie la plus basse de la toiture b_2 .

6.5. Accumulation au droit des saillies et obstacles

6.5.1. Des accumulations de neige peuvent se produire en cas de vent sur toutes toitures présentant des obstacles ; ceux-ci créant des zones d'ombre aérodynamique où se produit l'accumulation (voir figure 13).

6.5.2. Il convient d'adopter les valeurs suivantes pour les coefficients de forme et les longueurs l_s :

- $\mu_1 = 0.8$
- $\mu_2 = \gamma h / S_k$ avec la limitation $0.8 \leq \mu_2 \leq 2.0$, (avec (γ) poids volumique de la neige égal à 2 kN/m^3) ; S_k est donné en 3.1 ;
- $l_s = 2h$ avec la limitation $5 \text{ m} < l_s < 15 \text{ m}$.

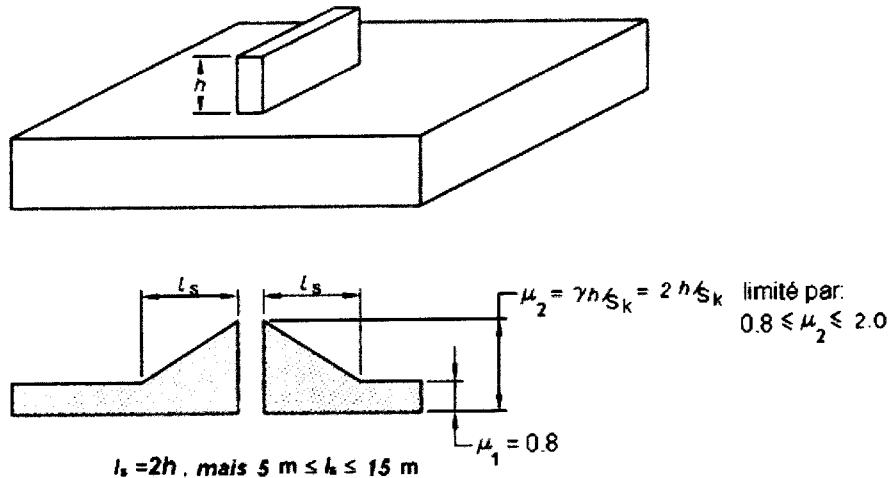


Figure 13 : Coefficients de forme au droit des saillies et obstacles.

7. CHARGES DE SABLE DANS LA ZONE D

7.1. Définition de la charge

La charge de sable résulte de l'accumulation des grains de sable, déposés par le vent sur les toitures et autres parties non couvertes des planchers.

Les valeurs des charges données ci-après seront considérées comme variables assimilables à la charge de neige.

7.2. Action de la charge de sable

7.2.1. Toitures plates ou à faibles pentes

Dans le cas des toitures plates ou à faibles pentes (pentes inférieures à 5%) la charge de sable doit être prise en compte sous forme d'une charge uniformément répartie (tableau 5).

7.2.2. Toitures rampantes

Dans le cas des terrasses rampantes et les toitures inclinées (un ou plusieurs versants, toitures en shed, voûtes et coupoles, etc.) il y a lieu de considérer une charge linéaire localisée le long des arrêtes basses des versants ou à la naissance des voûtes et coupoles. (fig. 14).

Les valeurs des charges q_1 et q_2 (en kN/ml) à prendre dans les calculs sont données par le tableau 4 en fonction de la zone où sera implanté l'ouvrage.

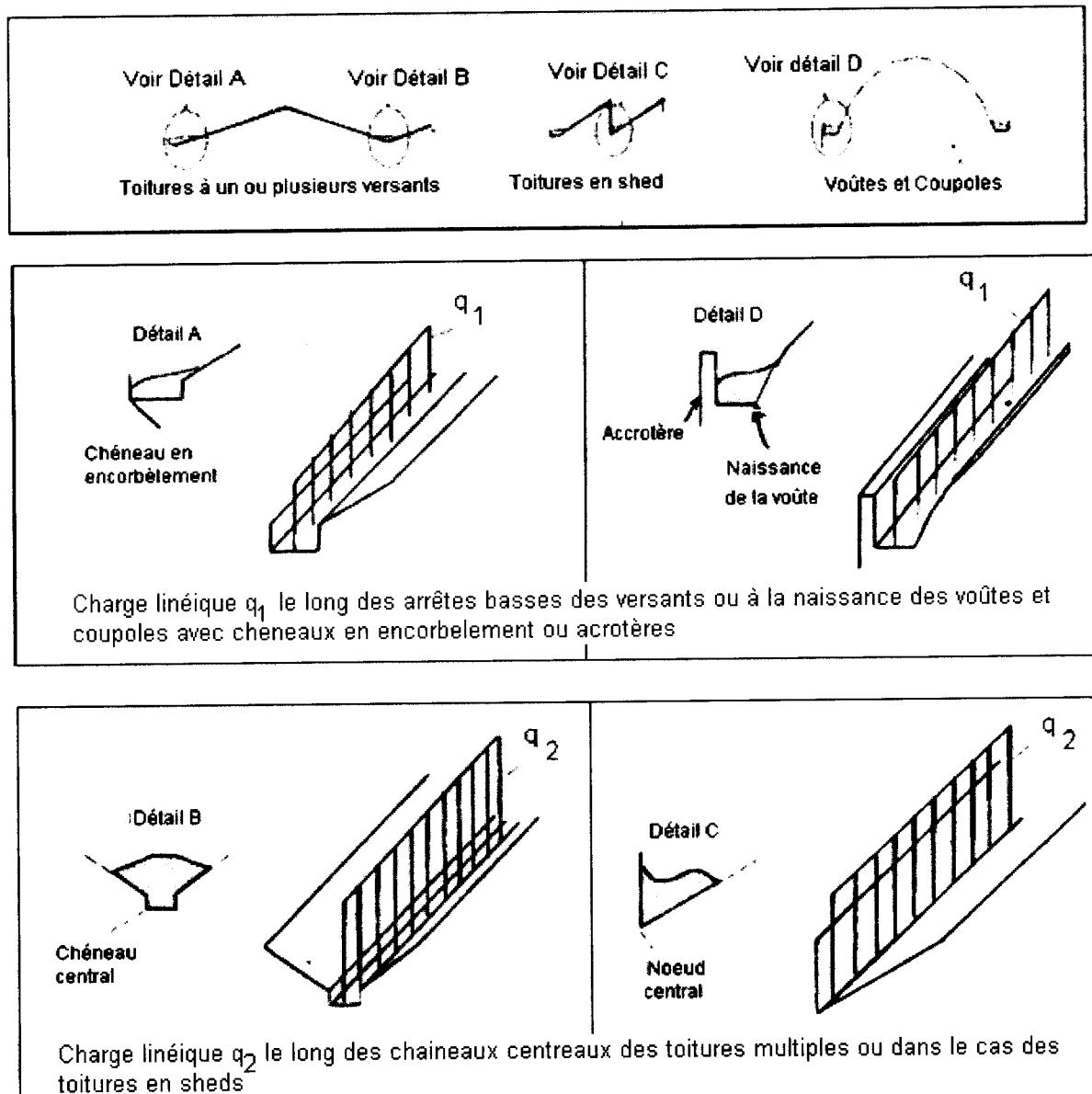


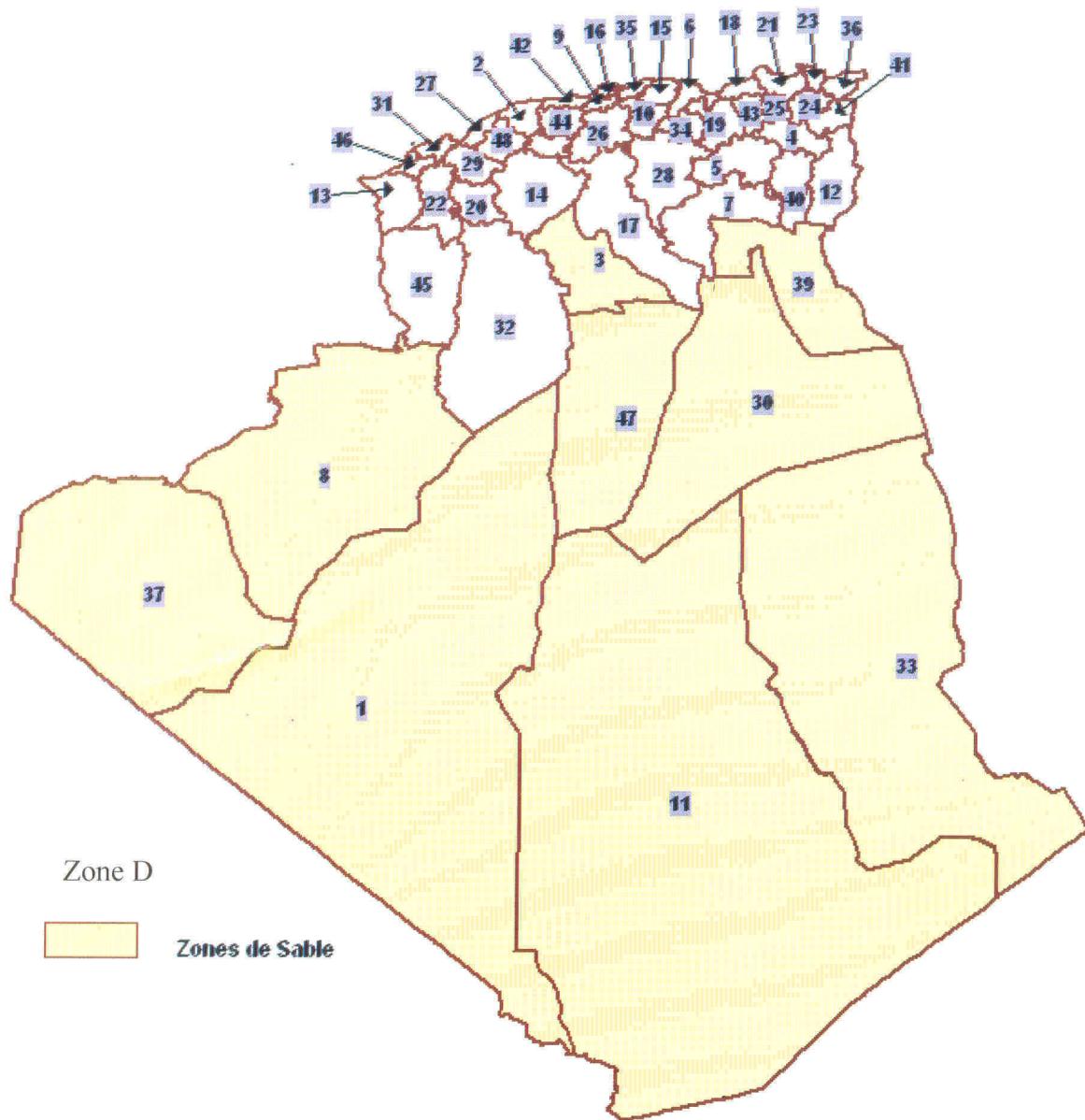
Figure 14 : Charge linéique à prendre dans les cas des toitures rampantes ou inclinées

Wilaya	Commune	Charge uniformément répartie (N/m ²)	q ₁ (kN/m)	q ₂ (kN/m)
ADRAR	Adrar Timimoun	0.20	0.30	0.40
	Reggane	0.15	0.25	0.35
	Aoulef			
	Bourdj Badji Moukhtar			
LAGHOUAT	Laghouat Hassi R'mel Ain Madhi Sidi Makhlouf Ksar El-Hiran	0.10	0.20	0.30
	Aflou Brida Gueltet Sidi-Saad Oued Merra EL Ghicha		Zone C	
	Bechar Abadla Kenadsa Beni-Ounnif	0.15	0.25	0.35
	Beni-Abbas Igli Tabelbala Ouled khedir Kerzaz El-Ouata Taghit	0.20	0.30	0.40
	Tamenghasset Silet Tazrouk	0.10	0.20	0.30
	Ain- Salah IN-Ghar In-Guezzam Tin-Zaouatine	0.20	0.30	0.35
	Ouargla Touggourt	0.20	0.30	0.40
OUARGLA	Le reste de la Wilaya	0.25	0.30	0.50
	Illizi	0.15	0.25	0.35
	In-Amenas	0.20	0.30	0.40
	Djanet Bourdj-El-Houass Debdeb Bordj-Omar-Driss Tarat	0.10	0.20	0.30
	Tindouf Oum-Laasel	0.20 0.25	0.30 0.40	0.40 0.50

EL-OUED	Djemaa M'gheier	0.15	0.25	0.35
	Le reste de la wilaya	0.30	0.40	0.60
GHARDAIA	Ghardaia Zelfana Metlili Sebseb Berriane Guerara Daia Mensoura	0.15	0.25	0.35
	El-menia Hassi Lefhal Hassi El- Gara	0.25	0.40	0.50

Tableau 5 : Charges de sable dans la zone D

Carte de zones de Sable



Wilaya	Code	Wilaya	Code	Wilaya	Code
Adrar	01	Djelfa	17	Illizi	33
Chlef	02	Djijel	18	Bordj Bouarerridj	34
Laghouat	03	Sétif	19	Boumerdes	35
Oum El Bouaghi	04	Saïda	20	El Tarf	36
Batna	05	Skikda	21	Tindouf	37
Béjaïa	06	Sidi Belabbès	22	Tissemssilt	38
Biskra	07	Annaba	23	El oued	39
Bechar	08	Guelma	24	Khenchela	40
Blida	09	Constantine	25	Souk Ahras	41
Bouira	10	Média	26	Tipaza	42
Tamanghasset	11	Mostaghanem	27	Mila	43
Tebessa	12	M'sila	28	Aïn Defla	44
Tlemcen	13	Mascara	29	Naama	45
Tiaret	14	Ouargla	30	Aïn Timouchent	46
Tizi Ouzou	15	Oran	31	Ghardaïa	47
Alger	16	El Bayadh	32	Relizane	48

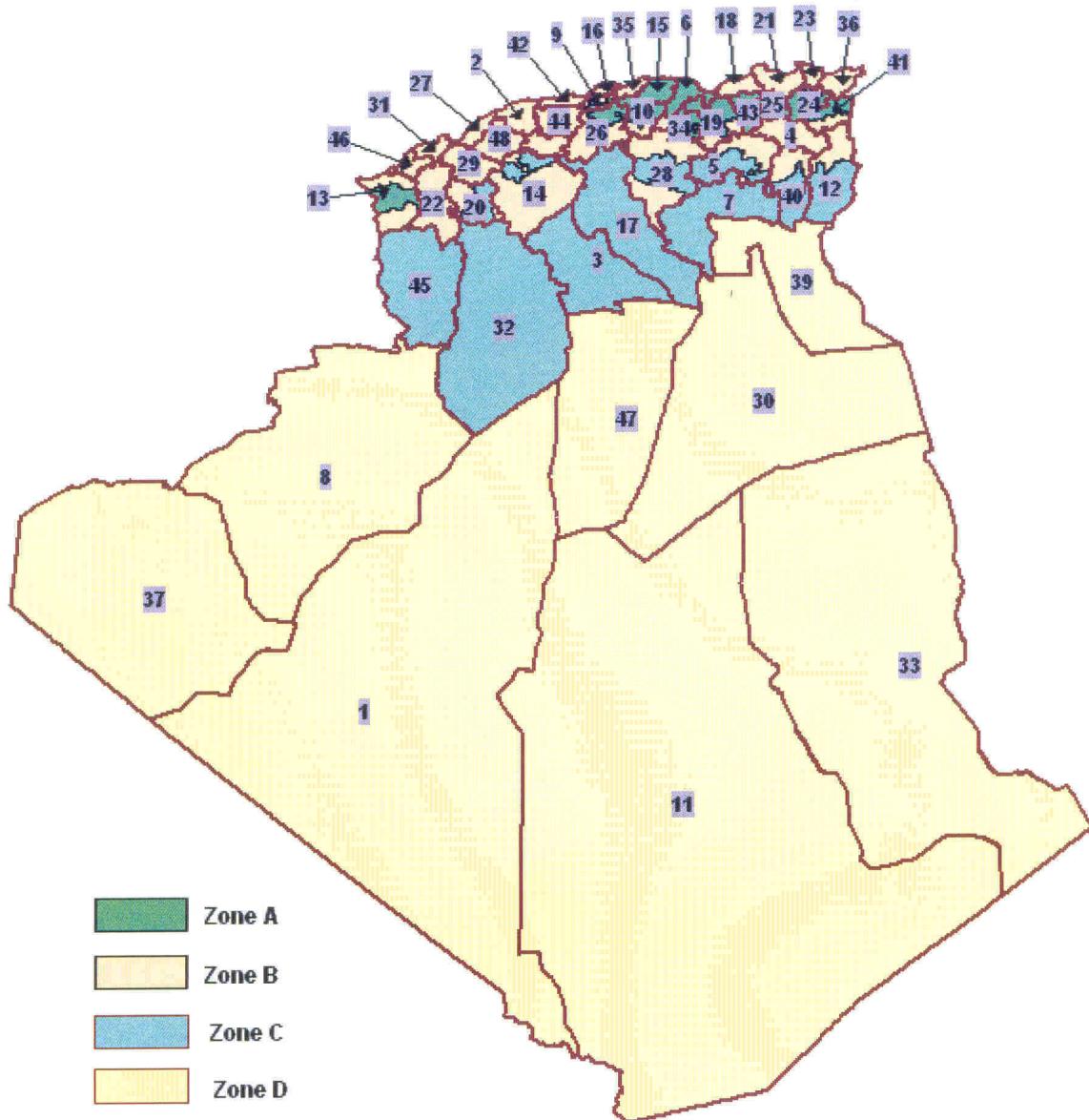
ANNEXE 1 : ZONES DE NEIGE PAR COMMUNE

10	BOUIRA Groupe de commune I DIRAH, MESDOUR, BORDJ OKHRISS EL-HAKIMIA, TAGUEDIT, DECHMIA, RIDANE, SOUR EL GHOZLANE, MAAMORA, HADJERA ZERGA.	B
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I.	
11	TAMANGHASSET	D
12	TEBESSA Groupe de commune I BIR-EL-ATER, ELMA-LABIODH, EL-MEZRAA, EL-OGLA-EL-MELHA, FERKANE, EL-HOUIDJBET, NEGRINE, OUM-ALI, SAFSAF EL OUESRA, STAHL-GUENTIS, THILIDJENE	C
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurants au groupe de commune I.	
13	TLEMCEN Groupe de commune I TLEMCEN, HAMMAM BOUGHERARA, ZENETA, OULED-RYAH, SABRA, SIDI-MEDJAHED, BENI-SNOUS, BENI-BAHDEL, SEBDOU, AIN-TALLOUT, AIN-FEZZA, MANSOURAH, OUED-CHOULI, MAGHNIA, BENI MESTER, BOUHLOU, BENI-BOUSSAID, AZAIL, AIN GHORABA, BENI-SEMIEL, OULED-MIMOUN, CHETOUANE, TERNY-BENI-HEDIEL, HENNAYA.	A
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	
14	TIARET Groupe de commune I AIN-BOUCHEKIF, BOUGARA, DAHMOUNE, DJILLALI BENAMAR, HAMADIA, MECHRAA SAFA, MEDROUSSA, MEGHILA MEHDIA, MELLAKOU, OULED LILLI, RAHOUIA, SEBAINE, SEBT, SIDI-BAKHTI, SIDI-HOSNI, TAGDEMT, TIDDA	C
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	
15	TIZI OUZOU	A
16	ALGER	B
17	DJELFA	C
18	JIJEL	B

19	SETIF Groupe de commune I SETIF-AIN EL KEBIRA-BENI AZIZ-AIN ROUA-DRAA KEBILA-BENI CHABANA-MAAOUIA-AIN LEGRADI-AIN ABESSA-DEHAMCHA-BOUGAA-TALAIIFACENE- GUENZET-TIZI N'BECHAR-BABOR-AIN LAHDJAR- BOUSSELAM AIN ARNAT-EL EULMA-DJEMILA-BENI OUARTILANE-OULED ADDOUANE-BELAA-AMOUCHA- TACHOUDA-BENI FOUDA-EL OURICIA-HARBIL- BOUANDAS-OULED EL BARAD-GUELTA ZERKA- MAOUAKLANE-AIT TIZI-BENI HOUCINE-AIT NAOUAL MEZADA-HAMMAM GUERGOUR-AIN SEBT-OULED SABOR-BENI MOUHLI-SERDJ EL GHOUl-MEZLOUG	A
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	B
20	SAIDA Groupe de commune I OULED BRAHIM-TIRCINE-EL HASSASNA-SIDI M'HAMED-MAAMOURA-AIN SKHOUNA	C
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I.	B
21	SKIKDA	B
22	SIDI BEL ABBES	B
23	ANNABA	B
24	GUELMA Groupe de commune I BOUATI MAHMOUD-NECHMAYA-AIN BEIDA FRAGHA	B
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	A
25	CONSTANTINE	A
26	MEDEA Groupe de commune I MEDEA-OUZERA-AISSAOUIA-OULED DEIDE-EL OMARIA- EL GUELBELKEBIR-MEZERANA-OULED BRAHIM-DAMIAT-EL HAMDANIA-BOUSKENE- DEUX BASSINS-DRAA ESSAMAR BOUCHRAHIL-BAATA- SIDI NAAMANE- BENCHICAO- EL AZIZIA-MEGHRAOUA SIDI MAHDJOUB-BENI SLIMANE- BERROUAGHIA MIHOUB - TABLAT - SEDRAIA - KHAMS DJOUAMAA	A
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	B

27	MOSTAGANEM	B
28	M'SILA Groupe de commune I OULED SLIMANE-ZARZOUR-BENI SROUR-OUTLEN OUITEN EL HOUAMED BOU SAADA-TAMSA-SIDI AMEUR-OULED SIDI BRAHIM-BENZOUH-MAARIF- CHELLAL KHOUBANA- M'CIF	C
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I.	B
29	MASCARA	B
30	OUARGLA	D
31	ORAN	B
32	EL BAYADH	C
33	ILLIZI	D
34	BORDJ BOU ARRERIDJ Groupe de commune I RAS EL OUED AIN TAGHROUT-DJAAFRA EL MAIN- OULED BRAHEM-BORDJ GHDIR- BORDJ ZEMMOURA- SIDI EMBAREK- BELIMOUR- MEDJANA-TENIET EN NASR- HASNAOUA-OULED DAHMANE-KHELIL TAFREG- COLLA-TESMART-BIR KASDALL	A
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I	B
35	BOUMERDES	B
36	EL TARF	B
37	TINDOUF	D
38	TISSEMSILT	B
39	EL OUED	D
40	KHENCHELA Groupe de commune I BABAR-CHERCHAR DJELLAL-EL OULDJA-KHIRANE	C
	Groupe de commune II Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de commune I.	B

Carte de zones Neige



Wilaya	Code	Wilaya	Code	Wilaya	Code
Adrar	01	Djelfa	17	Illizi	33
Chlef	02	Djijel	18	Bordj Bouarerridj	34
Laghouat	03	Sétif	19	Boumerdes	35
Oum El Bouaghi	04	Saïda	20	El Tarf	36
Batna	05	Skikda	21	Tindouf	37
Bejaïa	06	Sidi Belabbès	22	Tissemssilt	38
Biskra	07	Annaba	23	El oued	39
Bechar	08	Guelma	24	Khencela	40
Blida	09	Constantine	25	Souk Ahras	41
Bouira	10	Média	26	Tipaza	42
Tamanghasset	11	Mostaganem	27	Mila	43
Tebessa	12	M'sila	28	Aïn Defla	44
Tlemcen	13	Mascara	29	Naama	45
Tiaret	14	Ouargla	30	Aïn Timouchent	46
Tizi Ouzou	15	Oran	31	Ghardaïa	47
Alger	16	El Bayadh	32	Relizane	48

PARTIE II

ACTIONS DU VENT

SYMBOLES POUR LA PARTIE II

1. Majuscules latines

A	Aire (calcul de ϕ)
C_d	Coefficient dynamique
C_e	Coefficient d'exposition
C_f	Coefficient de force
$C_{f,0}$	Coefficient de force des constructions ou des éléments ayant un élancement infini
C_{fr}	Coefficient de frottement
C_{lat}	Coefficient d'excitation dynamique
$C_p, C_{p.net}$	Coefficient de pression nette
C_r	Coefficient de rugosité
C_t	Coefficient de topographie
F_{fr}	Force de frottement résultante
F_{Yj}	Force d'excitation par le détachement tourbillonnaire au point j de la construction
F_W	Force aérodynamique résultante
H	Hauteur d'un obstacle topographique
I_v	Intensité de turbulence
K	Facteur de déformée modale
K_T	Facteur de terrain
K_w	Facteur de longueur de corrélation effective
L	Longueur de la construction
L_e	Longueur effective du versant au vent d'un obstacle topographique
L_i	Échelle intégrale de turbulence
L_v	Longueur réelle du versant au vent d'un obstacle topographique
M_s	Masse de la structure d'une cheminée
M_t	Masse totale d'une cheminée
N_x	Fréquence adimensionnelle
Q_0	Partie non résonante de la réponse
Re	Nombre de Reynolds
R_x	Partie résonante de la réponse
S	Surface (calcul des actions)
S_c	Nombre de Scruton
S_t	Nombre de Strouhal
V_{crit}	Vitesse critique de détachement tourbillonnaire
V_m	Vitesse moyenne du vent
V_{ref}	Vitesse de référence du vent
W	Pression aérodynamique

2. Minuscules latines

b	Dimension de la construction perpendiculairement au vent ; diamètre
d	Dimension d'une construction dans la direction du vent
e	Excentricité ou longueur
f_m	Coefficient lié à la nature de la cheminée (calcul de C_d)
g	Facteur de pointe
h	Hauteur de la construction
k	Rugosité équivalente
k_{red}	Coefficient pour le calcul de C_t
ℓ	Longueur d'une construction
m	Masse par unité de longueur
m_l	Masse équivalente par unité de longueur
$n_{l,x}$	Fréquence fondamentale de vibration dans la direction du vent
$n_{l,y}$	Fréquence fondamentale de vibration perpendiculaire à la direction du vent
$q_{réf}$	Pression dynamique moyenne de référence ;
q_p	Pression dynamique de pointe ;
s_{max}	Coefficient pour le calcul de C_t
t	Temps d'intégration de la vitesse de référence du vent
x	Distance horizontale du site au sommet d'un obstacle topographique
$max y_F$	Amplitude maximale perpendiculairement au vent pour la vitesse critique du vent
z	Hauteur au-dessus du sol
z_0	Paramètre de rugosité
z_{eq}	Hauteur équivalente
z_{min}	Hauteur minimale

3. Majuscules grecques

Φ	Pente du versant au vent
$\Phi_{l,x}$	Déformée du mode fondamental dans la direction du vent

4. Minuscules grecques

α	Coefficient pour le calcul de C_t
δ	Décrément logarithmique d'amortissement
δ_a	Décrément logarithmique d'amortissement aérodynamique
δ_s	Décrément logarithmique d'amortissement structural
ε	Coefficient (calcul de C_d)
φ	Taux de remplissage, obstruction d'une toiture isolée
λ	Élancement
ν	Fréquence moyenne ; viscosité cinématique
ν_0	Fréquence moyenne de l'effet de turbulence
ρ	Masse volumique de l'air
ψ_0, ψ_1, ψ_2	Facteurs de combinaison
ψ_r	Facteur de réduction du coefficient de force pour les sections rectangulaires à angles arrondies
ψ_λ	Facteur de réduction du coefficient de force (facteur d'élancement)
μ_p	Indice de perméabilité

ξ Exposant de la déformée modale
 θ Directions orthogonales de vent

5. Indices

$crit$ Critique
 e Externe, exposition
 fr Frottement
 i Interne
 j Repère d'un élément ou d'un point d'une construction
 m Moyen
 $r\acute{e}f$ Référence
 x Direction du vent
 y Direction perpendiculaire à celle du vent

CHAPITRE 1

NOTIONS GENERALES

1.1. Objectif

Le présent document technique réglementaire (DTR) fournit les procédures et principes généraux pour la détermination des actions du vent sur l'ensemble des bâtiments et constructions y compris leurs composants et éléments de façade.

1.2. Domaine d'application

1.2.1. Le présent DTR s'applique aux constructions suivantes dont la hauteur est inférieure à 200 m :

- l'ensemble des bâtiments (à usage d'habitation, administratif, scolaire, industriel, de santé, lieux de culte, et d'autres usages.) ;
- les cheminées et ouvrages assimilables ;
- les ouvrages de stockage (réservoirs, châteaux d'eau, silos, et autres.) ;
- les structures verticales et horizontales en treillis (pylônes, grues, échafaudages, passerelles et autres) ;
- les panneaux de signalisation, murs de clôtures et drapeaux.

1.2.2. Le présent DTR ne s'applique pas directement aux :

- ponts ;
- mâts haubanés ;
- ouvrages en mer (plates-formes offshore) ;
- ouvrages spéciaux nécessitant des conditions de sûreté exceptionnelles (centrales nucléaires par exemple).

Pour les ouvrages cités en 1.2.2., il y a lieu de se référer aux méthodes usuelles qui doivent être définies dans les pièces du marché.

Certaines données ou méthodes fournies par ce DTR, non directement propres aux cas étudiés (par exemple les valeurs de la vitesse de référence) pourraient être utilisées pour les ouvrages cités en 1.2.2.

1.3. Termes associés à la vitesse du vent

Vitesse de pointe : La vitesse de pointe est la valeur quasi-instantanée de la vitesse du vent.

Vitesse moyenne : La vitesse moyenne V_m du vent est la vitesse moyenne dans un intervalle de temps de 10 minutes.

Vitesse moyenne caractéristique : La vitesse moyenne caractéristique (ou vitesse caractéristique) est la valeur caractéristique de la vitesse moyenne du vent.

Vitesse moyenne de référence : La vitesse moyenne de référence V_{ref} (ou vitesse de référence) est la valeur caractéristique de la vitesse moyenne du vent mesurée dans les conditions conventionnelles (cf. ann2.63.1exe 1).

Pression du vent : À chaque vitesse V correspond une pression du vent W : la pression du vent peut être positive (surpression) ou négative (dépression, succion) représentant l'action du vent sur une paroi d'une construction.

vitesse critique : La vitesse critique du vent V_{crit} est la vitesse moyenne du vent à partir de laquelle un effet dynamique supplémentaire peut se produire.

1.4. Principes généraux

1.4.1. Modélisation de l'action du vent

Les actions exercées par le vent sont considérées comme des actions fixes variables.

L'action du vent est représentée par un ensemble simplifié de pressions, ou de forces.

L'action du vent est supposée perpendiculaire aux surfaces extérieures et intérieures des constructions. Pour les surfaces allongées, l'action du vent peut aussi être tangentielle (forces de frottement).

1.4.2. Autres valeurs représentatives

Outre la valeur caractéristique notée Q qui est la principale valeur représentative, les autres valeurs représentatives rentrant dans les différentes combinaisons d'actions sont définies comme suit :

- La valeur de combinaison égale à $\psi_0.Q_k$ avec $\psi_0 = 0.6$;
- La valeur fréquente égale à $\psi_1.Q_k$ avec $\psi_1 = 0.5$;
- La valeur quasi-permanente égale à $\psi_2.Q_k$ avec $\psi_2 = 0$.

CHAPITRE 2**BASES DE CALCUL****2.1. Direction du vent**

Le calcul doit être effectué séparément pour chacune des directions perpendiculaires aux différentes parois de la construction. Par exemple :

- pour une construction rectangulaire, on considérera les deux directions du vent ;
- pour une construction circulaire, on considérera une direction du vent ;
- pour un polygone, on considérera autant de directions du vent que de côtés. Néanmoins, un polygone régulier de plus de dix côtés pourra être considéré comme une construction circulaire dont le diamètre est celui du cercle circonscrit ;
- pour les constructions ajourées ou en treillis, d'autres directions sont à considérer.

2.2. Procédures de calcul

Le tableau 2.1 présente un résumé des étapes de calcul des actions du vent. La colonne 3, correspond au paragraphe relatif à chaque paramètre.

Paramètre	Symbole	Renvoi
<ul style="list-style-type: none"> - Pression dynamique de référence - Hauteur de référence - Catégorie de terrain et facteurs de site - Intensité de turbulence I_v - Coefficient de topographie - Coefficient de rugosité - Coefficient d'exposition - Pression dynamique de pointe 	q_{ref} z_e - I_v $C_t(z)$ $C_r(z)$ $C_e(z)$ q_p	§ 2.3.1 § 2.3.2 § 2.4.3 § 2.4.6 § 2.4.5. § 2.4.4 § 2.4 § 2.3
Pression exercée par le vent (par exemple sur les revêtements, bardages, fixations et éléments de construction) <ul style="list-style-type: none"> - Coefficient de pression intérieur - Coefficient de pression extérieur - Coefficient de pression net - Coefficient de force - Pression aérodynamique extérieure - Pression aérodynamique intérieure 	C_{pi} C_{pe} C_{pnet} C_f $W_e = q_p \cdot C_{pe}$ $W_i = q_p \cdot C_{pi}$	§ 5.1 § 5.2 § 5.3 Chap. 4 § 2.6.2 § 2.6.2
Forces exercées par le vent (effets globaux par exemple) <ul style="list-style-type: none"> - Coefficient dynamique - Force exercée par le vent (à partir des coefficients de force) - Force exercée par le vent (à partir des coefficients de pression). 	C_d F_w F_w	Chap. 3 2.6.1 2.6.2

Tableau 2.1 : Étapes de calcul des actions dues au vent

2.3. Pression dynamique de pointe

2.3.1. Formule de calcul

La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$, à la hauteur de référence z_e est donnée par :

$$q_p(z_e) = q_{\text{réf}} \times C_e(z_e) \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.1)$$

Où :

$q_{\text{réf}}$ (en N/m^2) est la pression dynamique de référence donnée par le tableau 2.2 en fonction de la zone de vent (Cf. annexe 1) ;

C_e est le coefficient d'exposition au vent (Cf. §2.4) ;

z_e (en m) est la hauteur de référence donnée en 2.3.2 :

Zone	$q_{\text{réf}}$ (N/m^2)
I	375
II	435
III	500
IV	575

Tableau 2.2 : Valeurs de la pression dynamique de référence

Notes pour le tableau 2.2

$q_{\text{réf}}$ (en N/m^2) est calculée par : $q_{\text{réf}} = 0,5 \times \rho \times V_{\text{réf}}^2$, où $V_{\text{réf}}$ (en m/s) est la vitesse de référence du vent (voir annexe 1), et ρ (en kg/m^3) est la masse volumique de l'air. Dans le cadre de ce DTR, ρ a été pris égal à $1,20 \text{ kg/m}^3$.

Pour les constructions temporaires (durée d'utilisation inférieure à 5 ans); la pression de référence du tableau 2.2 est réduite de 28% (ce qui correspond à une réduction de 15 % sur la vitesse de référence)

2.3.2. Hauteur de référence z_e

- Pour les murs au vent des bâtiments à parois verticales, z_e est déterminé comme indiqué par la figure 2.1 ;
- Pour les murs sous le vent et parallèles au vent, z_e est pris égal à la hauteur du bâtiment au-dessus du niveau du sol ;
- Pour les toitures, z_e est pris égal à la hauteur maximale des bâtiments ;
- Pour tous les autres ouvrages la hauteur de référence est égale à la hauteur maximale de l'élément considéré.

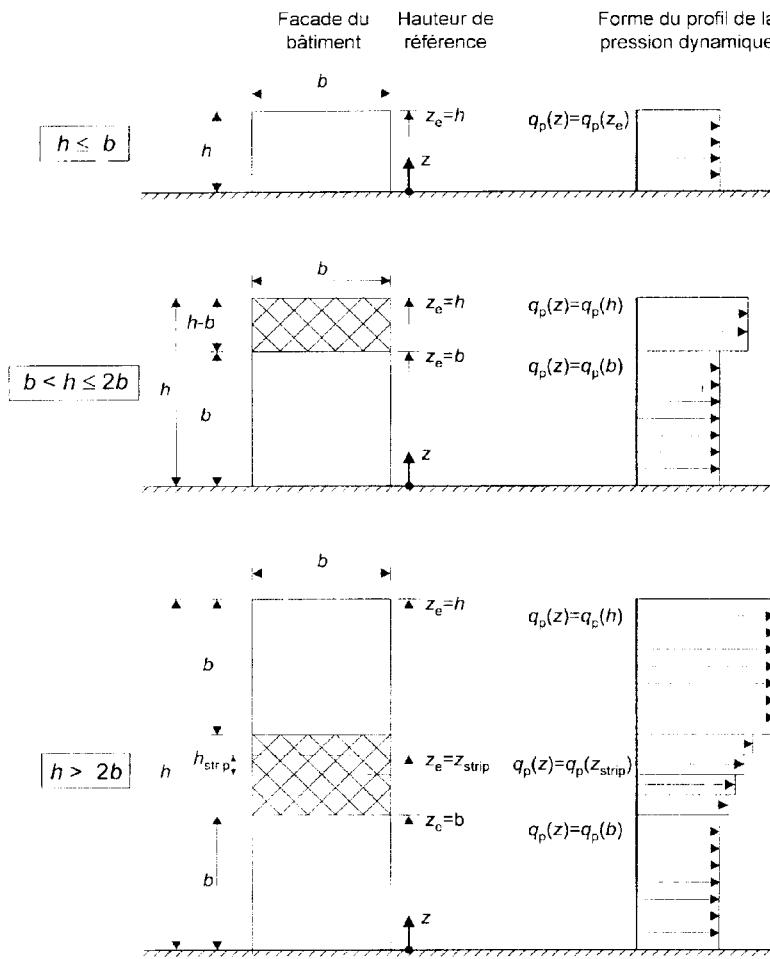


Figure 2.1 : Hauteur de référence z_e et profil correspondant de la pression dynamique

2.4. Coefficient d'exposition

2.4.1. Définitions

Le coefficient d'exposition au vent $C_e(z)$ tient compte des effets de la rugosité du terrain, de la topographie du site et de la hauteur au-dessus du sol. En outre, il tient compte de la nature turbulente du vent.

2.4.2. Formule de calcul

$C_e(z)$ est donné par :

$$C_e(z) = C_t^2(z) \times C_r^2(z) \times [1 + 7I_v(z)] \quad (2.2)$$

où :

- C_r est le coefficient de rugosité (Cf. § 2.4.4),
- C_t est le coefficient de topographie (Cf. § 2.4.5),
- $I_v(z)$ est l'intensité de la turbulence (Cf. § 2.4.6),
- z (en m) est la hauteur considérée.

Dans le cas où $C_t(z) = 1$ le coefficient d'exposition $C_e(z)$ est donné par le tableau 2.3.

Hauteur z (m)	Catégories de terrain				
	0	I	II	III	IV
≤ 1	1,811	1,545	1,423	1,276	1,173
2	2,137	1,883	1,423	1,276	1,173
5	2,603	2,373	1,929	1,276	1,173
10	2,983	2,776	2,352	1,703	1,173
15	3,216	3,025	2,616	1,973	1,440
20	3,387	3,207	2,810	2,174	1,640
25	3,521	3,352	2,965	2,335	1,801
30	3,633	3,472	3,094	2,470	1,937
35	3,729	3,575	3,205	2,587	2,055
40	3,813	3,666	3,302	2,690	2,159
50	3,956	3,820	3,468	2,865	2,337
60	4,074	3,947	3,606	3,012	2,487
70	4,175	4,056	3,725	3,139	2,617
80	4,264	4,152	3,829	3,250	2,731
100	4,414	4,315	4,006	3,440	2,926
125	4,566	4,480	4,187	3,634	3,127
150	4,692	4,617	4,337	3,796	3,295
175	4,800	4,735	4,466	3,936	3,440
200	4,895	4,838	4,579	4,058	3,568

Tableau 2.3 : Valeurs du coefficient d'exposition $C_e(z)$ pour $C_t(z) = 1$

2.4.3. Catégories de terrain

Les catégories de terrain sont données dans le tableau 2.4 ainsi que les valeurs des paramètres suivants :

- K_T , facteur de terrain ;
- z_0 (en m), paramètre de rugosité ;
- z_{\min} (en m), hauteur minimale ;
- ϵ , coefficient utilisé pour le calcul du coefficient C_d (cf. chapitre 3).

Lorsqu'il subsiste un doute quant au choix entre deux catégories de terrain, il y a lieu de retenir celui pour lequel les valeurs des paramètres associés sont les plus défavorables (catégorie de terrain la plus faible dans l'échelle de **0** à **IV**).

Catégories de terrain	K_T	z_0 (m)	z_{min} (m)	ϵ
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer	0,156	0,003	1	0,38
I Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles.	0,170	0,01	1	0,44
II Zone à végétation basse telle que l'herbe, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur.	0,190	0,05	2	0,52
III Zone à couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, des forêts permanentes).	0,215	0,3	5	0,61
IV Zones dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 m.	0,234	1	10	0,67

Tableau 2.4 : Définition des catégories de terrain

Note pour le tableau 2.4

- Des photos illustratives des rugosités de chaque catégorie de terrain sont données à titre d'exemple en annexe 4.

2.4.4. Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité $C_r(z)$ traduit l'influence de la rugosité et de la hauteur sur la vitesse moyenne du vent. Il est défini par la loi logarithmique (logarithme népérien) :

$$\begin{cases} C_r(z) = K_T \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{pour } z_{min} \leq z \leq 200\text{m} \\ C_r(z) = K_T \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) & \text{pour } z < z_{min} \end{cases} \quad (2.3)$$

Où :

- K_T est le facteur de terrain (tableau 2.4) ;
- z_0 (en m) est le paramètre de rugosité (tableau 2.4) ;
- z_{min} (en m) est la hauteur minimale (tableau 2.4) ;
- z (en m) est la hauteur considérée.

Les valeurs du coefficient de rugosité sont données par le tableau 2.5 en fonction de la catégorie du terrain et de la hauteur

Hauteur z (m)	Catégories de terrains				
	0	I	II	III	IV
≤ 1	0,906	0,783	0,701	0,605	0,539
2	1,014	0,901	0,701	0,605	0,539
3	1,078	0,970	0,778	0,605	0,539
5	1,157	1,056	0,875	0,605	0,539
10	1,265	1,174	1,007	0,754	0,539
15	1,329	1,243	1,084	0,841	0,634
20	1,374	1,292	1,138	0,903	0,701
25	1,408	1,330	1,181	0,951	0,753
30	1,437	1,361	1,215	0,990	0,796
35	1,461	1,387	1,245	1,023	0,832
40	1,482	1,410	1,270	1,052	0,863
50	1,517	1,448	1,312	1,100	0,915
60	1,545	1,479	1,347	1,139	0,958
70	1,569	1,505	1,376	1,172	0,994
80	1,590	1,528	1,402	1,201	1,025
100	1,625	1,566	1,444	1,249	1,078
125	1,659	1,604	1,487	1,297	1,130
150	1,688	1,635	1,521	1,336	1,172
175	1,712	1,661	1,550	1,369	1,209
200	1,733	1,684	1,576	1,398	1,240

Tableau 2.5 : Valeurs du coefficient de rugosité $C_r(z)$

2.4.5. Coefficient de topographie

Le coefficient de topographie $C_t(z)$ prend en compte l'accroissement de la vitesse du vent lorsque celui-ci souffle sur des obstacles tels que les collines, les dénivellations isolées, etc.

2.4.5.1. Il convient de prendre en compte l'effet de topographie dans les limites des zones hachurées des figures 2.2 et 2.3.

2.4.5.2. $C_t(z)$ est déterminé comme suit :

$$\begin{cases} C_t(z) = 1 \text{ pour } \phi < 0,05 \\ C_t(z) = 1 + s_{\max} \times \left(1 - \frac{|x|}{k_{red} \times L} \right) \times e^{-\alpha(z/L)} \text{ pour } \phi \geq 0,05 \end{cases} \quad (2.4)$$

Où :

- ϕ est la pente du versant au vent $\phi = \frac{H}{L_u}$;
- H (en m) est la hauteur du versant ;
- L (en m) est une longueur caractérisant le versant au vent et prenant la valeur : $L = \max(0.5L_u ; 2H)$;
- x (en m) est la distance horizontale entre le lieu considéré et la crête de l'obstacle ;
- z (en m) est la distance verticale mesurée à partir du niveau du sol au lieu considéré

(site d'implantation);

- S_{max} , α et k_{red} sont des coefficients donnés dans le tableau 2.6 en fonction de la forme de l'obstacle et du rapport H/L.
- L_u et L_d respectivement la longueur du versant au vent et sous le vent.

Forme de l'obstacle	S_{max}	α	k_{red}	
			$x < 0$	$x > 0$
Collines	$2,2 \times H/L$	3	1,5	1,5
Falaises et escarpements	$1,3 \times H/L$	2,5	1,5	4

Tableau 2.6 : Paramètres relatifs à la détermination de $C_t(z)$

Lorsque la fonction $\left(1 - \frac{|x|}{k_{red} \times L}\right)$ prend une valeur négative il y a lieu de considérer la valeur nulle.

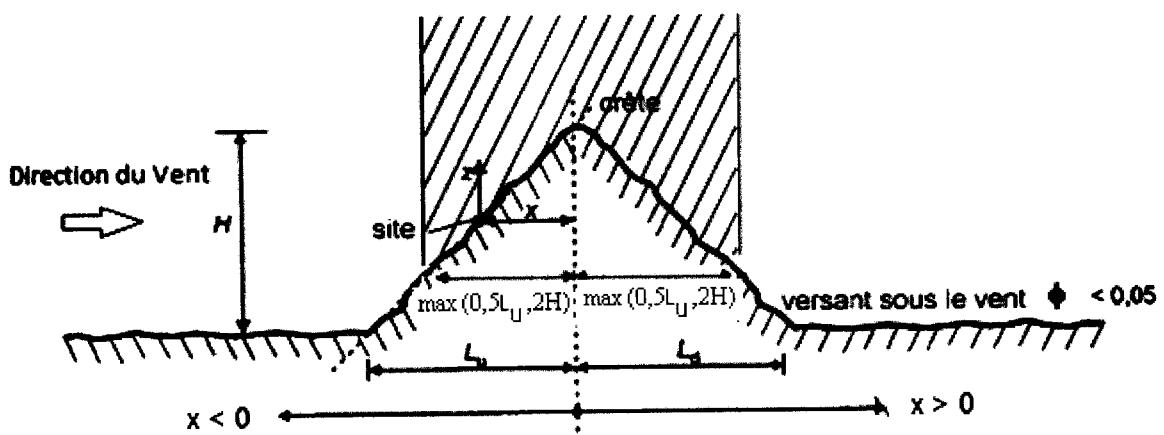


Figure 2.2 : Paramètres pour la détermination de $C_t(z)$ aux alentours des collines

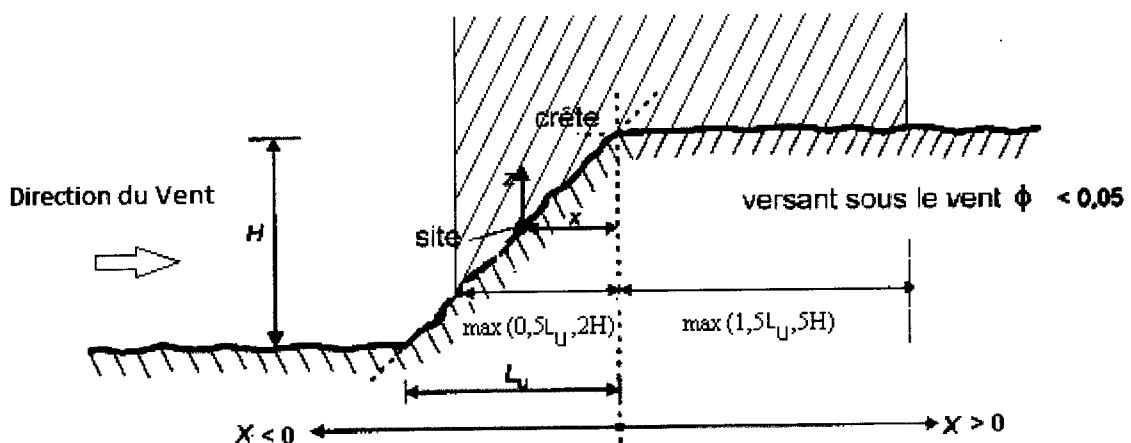


Figure 2.3: Paramètres pour la détermination de $C_t(z)$ aux alentours des falaises et escarpements

Les valeurs des fonctions S_{max} , $\left(1 - \frac{|x|}{k_{red} \times L}\right)$ et $e^{-\alpha.z/L}$ sont données dans le tableau 2.7 respectivement en fonction de H/L , x/L et z/L .

S_{max}			$\left(1 - \frac{ x }{k_{red} \times L}\right)$			$e^{-\alpha.z/L}$			
H/L	Collines	Falaises et Escarpements	x/L	Collines	Falaises et Escarpements		z/L	Collines	Falaises et Escarpements
					$x < 0$	$x > 0$			
0,05	0,11	0,065	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,000	1,000
		0,13	0,25	0,83	0,83	0,94	0,1	0,741	0,779
		0,195	0,5	0,67	0,67	0,88	0,2	0,549	0,607
		0,26	0,75	0,50	0,50	0,81	0,3	0,407	0,472
		0,325	1,0	0,33	0,33	0,75	0,4	0,301	0,368
		0,39	1,25	0,17	0,17	0,69	0,5	0,223	0,287
		0,455	1,5	0,00	0,00	0,63	0,6	0,165	0,223
		0,585	1,75	0,00	0,00	0,56	0,7	0,122	0,174
		1,10	0,65	2,0	0,00	0,00	0,50	0,091	0,135
			2,25	0,00	0,00	0,44	0,9	0,067	0,105
			2,5	0,00	0,00	0,38	1,0	0,050	0,082
			2,75	0,00	0,00	0,31	1,25	0,024	0,044
			3,0	0,00	0,00	0,25	1,5	0,011	0,024
			3,25	0,00	0,00	0,19	1,75	0,005	0,013
			3,5	0,00	0,00	0,13	2,0	0,002	0,007
		3,75	0,00	0,00	0,06	2,5	0,001	0,002	
		4,0	0,00	0,00	0,00	3,0	0,000	0,001	

Tableau 2.7 : Valeurs des fonctions définissant $C_t(z)$

2.4.6. Intensité de turbulence

L'intensité de la turbulence est définie comme étant l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent et est donnée par l'équation 2.5 a et b.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln(\frac{z}{z_0})} \quad \text{pour } z > z_{\min} \\ I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln(\frac{z_{\min}}{z_0})} \quad \text{pour } z \leq z_{\min} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Où :

- $C_t(z)$ est le coefficient de topographie (Cf. § 2.4.5),
- z_0 (en m) est le paramètre de rugosité (Cf. tableau 2.4) ;
- z_{\min} est la hauteur minimale (Cf. tableau 2.4).

2.5. Calcul de la pression due au vent

2.5.1. Hypothèses et conventions

Les pressions W_e , pression sur la face extérieure d'une paroi, et W_i , pression sur la face intérieure d'une paroi, sont comptées positivement s'il s'agit de surpression, et négativement s'il s'agit de dépression. On représente les pressions par des vecteurs perpendiculaires aux parois. Si le vecteur est orienté vers la paroi, il s'agit d'une surpression, sinon il s'agit d'une dépression (voir figure 2.4).

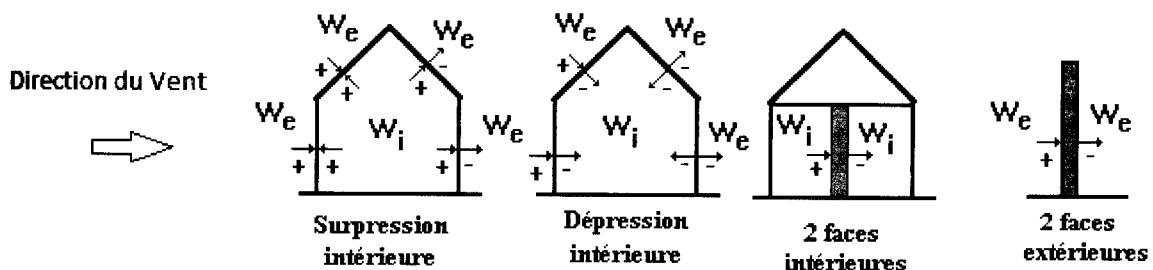


Figure 2.4 : Conventions pour la représentation des pressions sur les parois

2.5.2. Détermination de la pression aérodynamique

la pression aérodynamique $W(z_j)$ agissant sur une paroi est obtenue à l'aide des formules suivantes :

- si une face de la paroi est intérieure à la construction, l'autre extérieure :

$$W(z_j) = q_p(z_e) \times [C_{pe} - C_{pi}] \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.6)$$

- si les deux faces de la paroi sont extérieures (cas d'éléments isolés tels que toitures)

isolées, balcons, etc.) :

$$W(z_j) = q_p(z_e) \times C_{p,net} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.7)$$

- si les deux faces de la paroi sont intérieures :

$$W(z_j) = q_p(z_e) \times [C_{pi,1} - C_{pi,2}] \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.8)$$

Où :

- $q_p(z_e)$ (en N/m^2) est la pression dynamique de pointe calculée à la hauteur z_e relative à l'élément de surface j (Cf. § 2.3) ;
- $C_{p,net}$ (noté aussi C_p coefficient de pression) est le coefficient de pression nette donné au chapitre 5 pour certains éléments de construction (toitures isolées, balcons, etc.) ;
- C_{pe} est le coefficient de pression extérieure défini au chapitre 5.
- C_{pi} est le coefficient de pression intérieure défini au chapitre 5.

2.6. Actions d'ensemble

2.6.1. Calcul des forces à l'aide des coefficients de forces

La force exercée par le vent F_w agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée directement en utilisant l'expression (2.9) ou (2.10)

$$F_w = C_d \times C_f \times q_p(z_j) \times A_{ref} \quad [\text{N}] \quad (2.9)$$

Ou par sommation vectorielle sur les éléments de construction individuels à l'aide de l'expression.

$$F_w = C_d \times \sum C_f \times q_p(z_j) \times A_{ref} \quad [\text{N}] \quad (2.10)$$

Où :

- C_d est le coefficient dynamique défini au chapitre 3 ;
- C_f est le coefficient de force défini au chapitre 4.

2.6.2. Calcul des forces à l'aide des pressions de surfaces

La force exercée par le vent F_w agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée par sommation vectorielle des forces $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ et F_{fr} respectivement données par :

- Forces extérieures : $F_{w,e} = C_d \times \sum W_e \times A_{ref}$
- Forces intérieures : $F_{w,i} = \sum W_i \times A_{ref}$
- Forces de frottement : $F_{fr} = C_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr}$

Où :

- W_e est la pression extérieure exercée sur la surface élémentaire à la hauteur z_e , donnée par l'expression;

$$W_e = q_p(z_e) \times C_{pe}$$

- W_i est la pression intérieure exercée sur la surface élémentaire à la hauteur z_i , donnée par l'expression :

$$W_i = q_p(z_i) \times C_{pi}$$

- A_{ref} est l'aire de référence de la surface élémentaire ;
- C_{fr} est le coefficient de frottement (*Cf. tableau 2.8*);
- A_{fr} est l'aire de la surface extérieure parallèle au vent, (*Cf. tableau 2.9*);
- z_e ; z_i respectivement les hauteurs de référence des pressions extérieures, et intérieures.

2.6.3. Effets du frottement

Les effets de frottement du vent sur la surface peuvent être négligés lorsque l'aire totale de toutes les surfaces parallèles au vent (ou faiblement inclinées par rapport à la direction du vent) est inférieure ou égale à 4 fois l'aire totale de toutes les surfaces extérieures perpendiculaires au vent (au vent et sous le vent).

État de surface	Coefficient de frottement C_{fr}
Lisse (acier, béton lisse, ondulations parallèles au vent, paroi enduite, etc.)	0,01
Rugueux (béton rugueux, paroi non enduite, etc.)	0,02
Très rugueux (ondulations perpendiculaires au vent, nervures, plissemens, etc.)	0,04

Tableau 2.8 : Valeurs des coefficients de frottement

Pour déterminer la force de frottement, la subdivision des parois parallèles au vent (dont la somme des aires est appelée aussi aire de frottement) doit tenir compte des états de surfaces différents.

Il convient d'appliquer les forces de frottement sur la partie des surfaces extérieures parallèles au vent situées à une distance des bords au vent ou des angles au vent égale à la plus petite valeur de 2b ou 4d.

2.6.4. Aire de frottement

L'aire de frottement A_{fr} doit être déterminée comme indiqué dans le tableau 2.9.

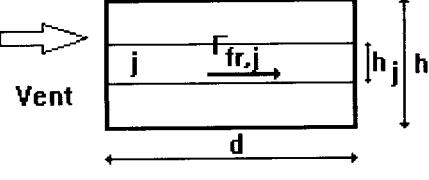
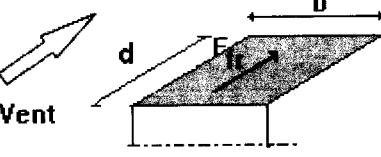
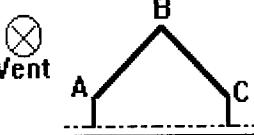
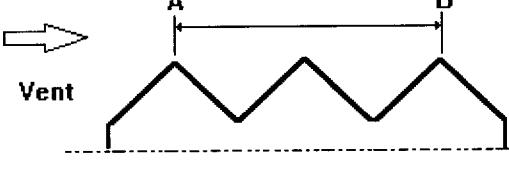
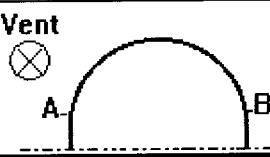
Type de paroi	Schéma	A_{fr} ou $A_{fr,j}$ (en m^2)
Paroi verticale		$A_{fr,j} = d \times h_j$ $A_{fr} = d \times h$
Toiture plate ou couverture		$A_{fr} = d \times b$
Toiture à deux versants Vent parallèle aux génératrices		$A_{fr} = (\text{longueur ABC du déroulé}) \times d$
Toiture à versants multiples - Toiture en sheds Vent parallèle aux génératrices		$A_{fr} = (\text{somme des longueurs des déroulés de la toiture}) \times d$
Toiture à versants multiples - Toiture en sheds Vent perpendiculaire aux génératrices		$A_{fr} = (\text{longueur AB}) \times d$ AB est la longueur projetée en plan de la toiture sans considérer le premier et le dernier versant
Toiture en forme de voûte Vent parallèle aux génératrices		$A_{fr} = (\text{longueur de l'arc AB}) \times d$

Tableau 2.9 : Aire de frottement A_{fr}

Notes pour le tableau 2.9

- d (en m) désigne la dimension de la construction parallèle au vent ;
- b (en m) désigne la dimension de la construction perpendiculaire au vent.

2.6.5. Prise en compte de l'effet de torsion

Pour les constructions de forme autres que de révolution, et dans le cas d'un calcul de l'action d'ensemble, l'effet de torsion induit par un vent oblique, ou en raison de l'imparfaite corrélation des actions du vent sur les parois, peut être pris en considérant le cas de charge de la figure 2.5.

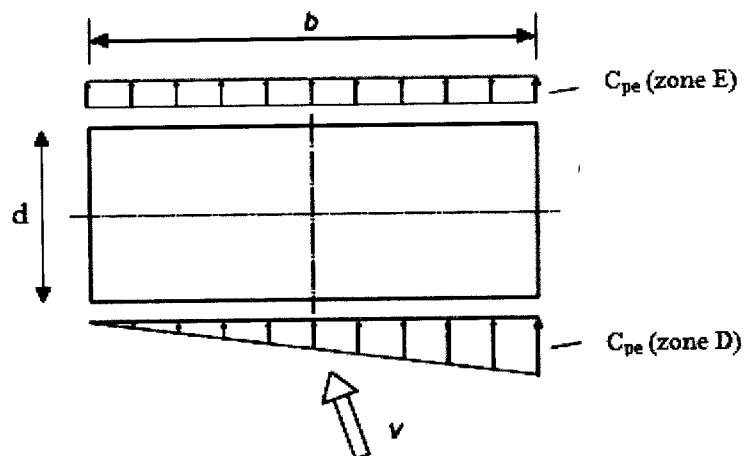


Figure 2.5 : Répartition des pressions pour la prise en compte des effets de torsion

Où :

- La zone D : est la face au vent dans la direction perpendiculaire à l'action du vent ;
- La zone E : est la face sous le vent dans la direction perpendiculaire à l'action du vent.

CHAPITRE 3**COEFFICIENT DYNAMIQUE****3.1. Définition et principes de détermination de C_d**

Le coefficient dynamique C_d tient compte des effets de réduction dus à l'imparfaite corrélation des pressions exercées sur les parois ainsi que des effets d'amplification dus à la partie de turbulence ayant une fréquence proche de la fréquence fondamentale d'oscillation de la structure.

D'une manière générale, le coefficient C_d peut être déterminé selon la procédure du paragraphe 3.3. Cependant, la valeur simplifiée du §3.2 peut être admise sous réserve de satisfaire les conditions qui y sont énoncées.

3.2 Valeur simplifiée

Une valeur conservative de $C_d=1$ peut être considérée dans les cas suivants:

- Bâtiments, dont la hauteur est inférieure à 15m ;
- Eléments de façade et de toiture dont la fréquence propre est inférieure à 5 Hz ;
- Bâtiment à ossature comportant des murs, dont la hauteur est à la fois inférieure à 100m et à 4 fois la dimension du bâtiment mesurée dans la direction perpendiculaire à la direction du vent;
- Cheminée à section transversale circulaire dont la hauteur est inférieure à 60m et à 6.5 fois le diamètre

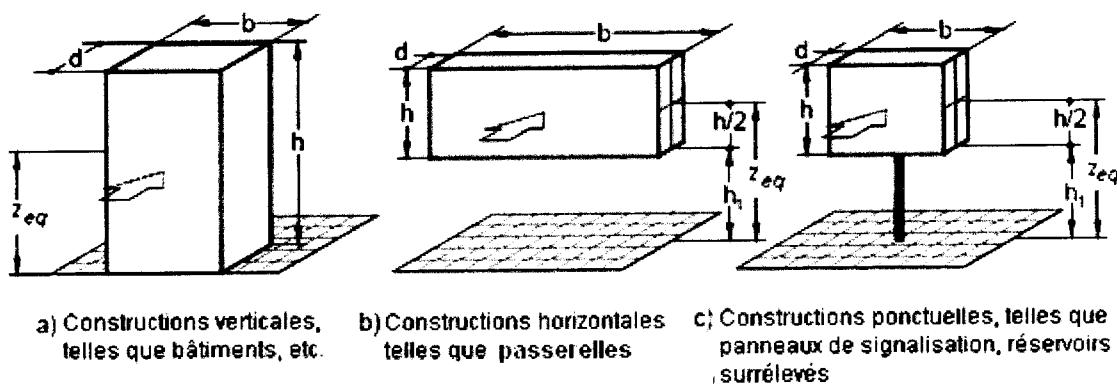
3.3. Formule générale

Dans les cas où le type de construction correspond à l'une des dispositions de la fig. 3.1, le coefficient C_d peut être déterminé en utilisant la procédure détaillée suivante basée sur l'expression :

$$C_d = \frac{1+2 \times g \times I_v(z_{eq}) \times \sqrt{Q^2 + R^2}}{1+7 \times I_v(z_{eq})} \quad (3.1)$$

Où :

- z_{eq} (en m) est la hauteur équivalente de la construction (Cf. fig. 3.1),
- $I_v(z_{eq})$ est l'intensité de la turbulence pour $z = z_{eq}$, (Cf. § 2.4.6.)
- Q^2 est la partie quasi-statique donnée en 3.3.1 ;
- R^2 est la partie résonante donnée en 3.3.2 ;
- g est le facteur de pointe donné en 3.3.3.



$$z_{eq} = 0.6 \times h \geq z_{min}$$

$$z_{eq} = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{min}$$

$$z_{eq} = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{min}$$

Figure 3.1 : Cas de disposition des constructions

3.3.1. Partie quasi-statique

La partie quasi-statique (Q^2) est donnée par l'équation 3.2 et représentée graphiquement par la figure 3.2.

$$Q^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \times \left(\frac{(b+h)}{L_i(z_{eq})} \right)^{0,63}} \quad (3.2)$$

Avec:

- b et h (en m) sont la largeur et la hauteur de la construction telles que représentées sur la figure 3.1,
- $L_i(z_{eq})$ est l'échelle de turbulence pour $z = z_{eq}$ donnée par :

$$L_i(z) = 300 \times \left(\frac{z}{200} \right)^\varepsilon \quad \text{pour } z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m} \quad (3.3.a)$$

$$L_i(z) = L_i(z_{min}) \quad \text{pour } z \leq z_{min} \quad (3.3.b)$$

- où ε et z_{min} sont définis au chapitre 2 dans le tableau 2.4.

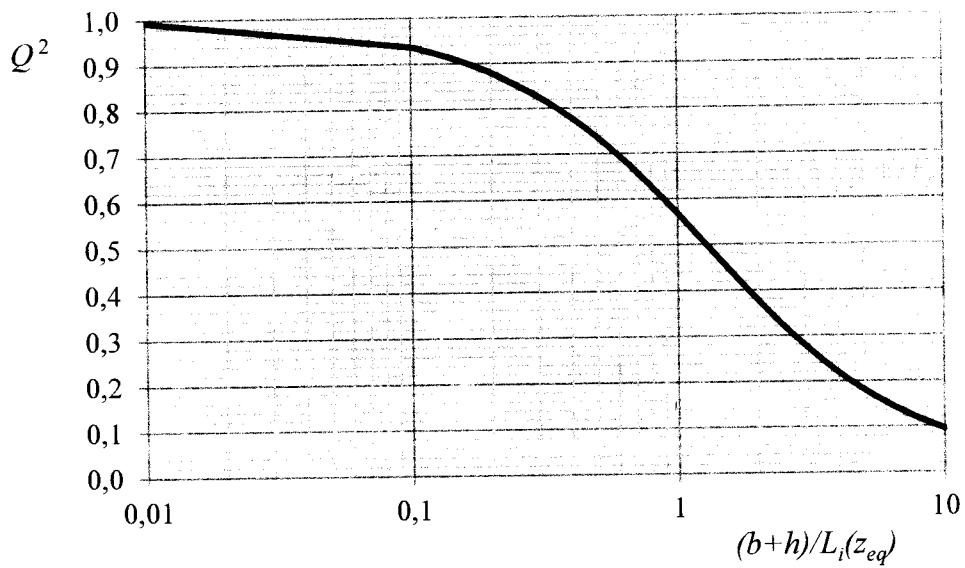


Figure 3.2 : Valeurs de la partie quasi statique (Q^2)

3.3.2. Partie résonnante

La partie résonnante (R^2) est définie comme suit :

$$R^2 = \frac{\Pi^2}{2 \times \delta} \times R_N \times R_h \times R_b \quad (3.4)$$

Où :

- R_N est la fonction adimensionnelle de la densité spectrale de puissance donnée par la figure 3.3 ou l'équation 3.5.

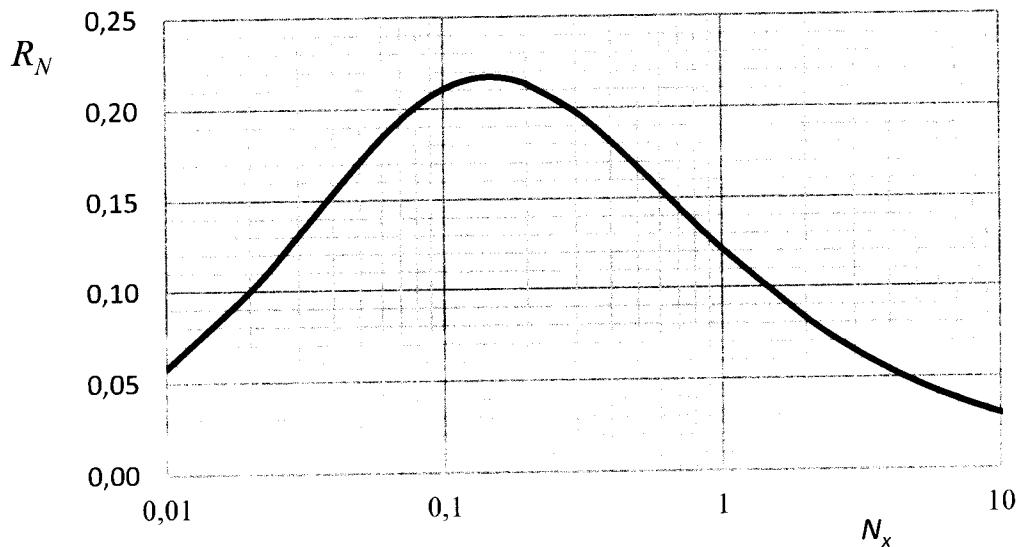


Figure 3.3 : Fonction adimensionnelle de la densité spectrale de puissance (R_N)

$$R_N = \frac{6,8 \times N_x}{(1+10,2 \times N_x)^{5/3}} \quad (3.5)$$

Où N_x est la fréquence adimensionnelle dans la direction x du vent donnée par :

$$N_x = \frac{n_{1,x} \times L_i(z_{eq})}{V_m(z_{eq})} \quad (3.6)$$

- R_h et R_b sont des fonctions d'admittance aérodynamique données par :

$$R_h = \left(\frac{1}{\eta_h} \right) - \left(\frac{1}{2 \times \eta_h^2} \right) \times (1 - e^{-2 \times \eta_h}) \text{ pour } \eta_h > 0 \quad R_h = 1 \text{ pour } \eta_h = 0 \quad (3.7.a)$$

$$R_b = \left(\frac{1}{\eta_b} \right) - \left(\frac{1}{2 \times \eta_b^2} \right) \times (1 - e^{-2 \times \eta_b}) \text{ pour } \eta_b > 0 \quad R_b = 1 \text{ pour } \eta_b = 0 \quad (3.7.b)$$

Avec :

$$\eta_h = \frac{4,6 \times N_x \times h}{L_i(z_{eq})} \quad (3.8.a)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \times N_x \times b}{L_i(z_{eq})} \quad (3.8.b)$$

- $n_{1,x}$ est la fréquence fondamentale donnée en §3.3.4
- $L_i(z_{eq})$ est l'échelle intégrale de turbulence donnée par l'expression 3.3
- $V_m(z_{eq})$: est la vitesse moyenne en annexe 2 pour $z = z_{eq}$

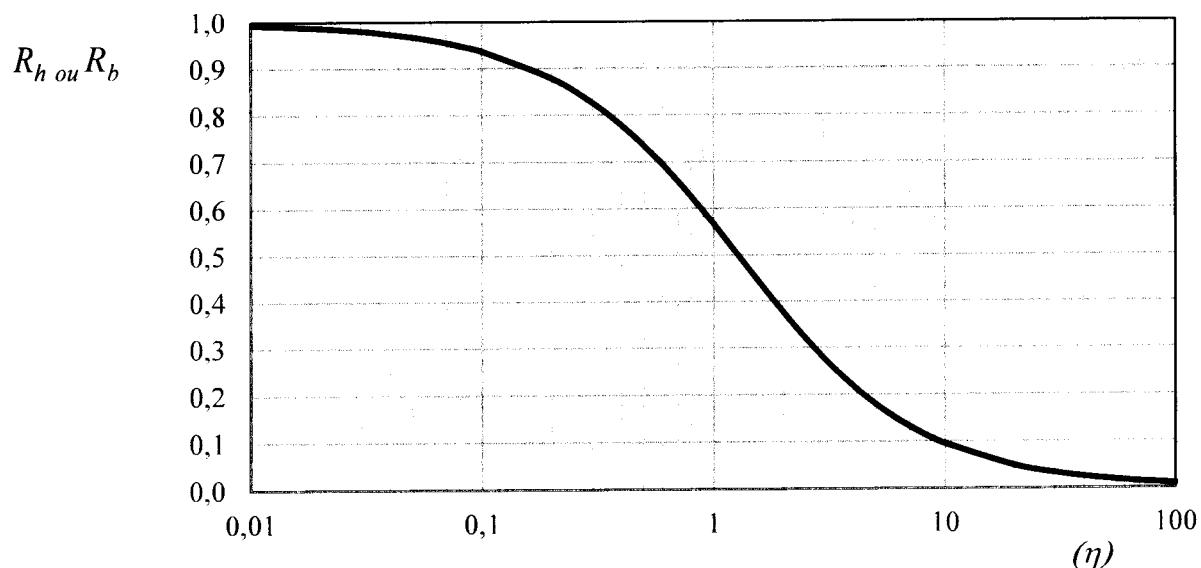


Figure 3.4 : Fonction d'admittance aérodynamique en fonction de η_h ou η_b

- δ est le décrément logarithmique d'amortissement des vibrations pour le mode fondamental dans la direction du vent donné par :

$$\delta = \delta_s + \delta_a \quad (3.9)$$

Où :

- δ_s est le décrément logarithmique d'amortissement structural (tableau 3.1),

Type de construction	δ_s
Bâtiments en béton armé	0,10
Bâtiments en acier	0,05
Structures mixtes béton + acier	0,08
Tours en béton armé	0,03
Cheminées en béton armé	0,03
Cheminées en acier soudé non revêtues sans isolation thermique	0,012
Cheminées en acier soudé non revêtues avec isolation thermique externe	0,020
Cheminées avec deux revêtements ou plus	0,020
Cheminées en acier avec revêtement en briques	0,070

Tableau 3.1 : décrément logarithmique d'amortissement structural

- δ_a est le décrément logarithmique d'amortissement aérodynamique pris égal à 0, excepté le cas des structures en treillis pour lesquelles δ_a est donné par

$$\delta_a = \frac{\rho \times b \times C_f}{2 \times n_{1,x} \times m_{1,x}} \times V_m(z_{eq}) \quad (3.10)$$

Où :

- ρ (en kg/m³) est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,20$ kg/m³),
- b (en m) est la dimension de la construction perpendiculaire au vent,
- C_f est le coefficient de force (Cf. chapitre 4),
- $n_{1,x}$ (en Hz) est la fréquence propre du mode fondamental dans la direction x du vent (Cf. § 3.3.4),
- $m_{1,x}$ (en kg/m) est la masse équivalente pour le mode fondamental et dans la direction x du vent (Cf. annexe 3, § 6.3.2),
- $V_m(z_{eq})$ (en m/s) est la vitesse moyenne du vent (Cf. annexe 2) pour $z = z_{eq}$ (Cf. fig. 3.1).

3.3.3. Facteur de pointe

Le facteur de pointe (g) est donné par l'équation 3.11 et illustrée par la figure 3.5:

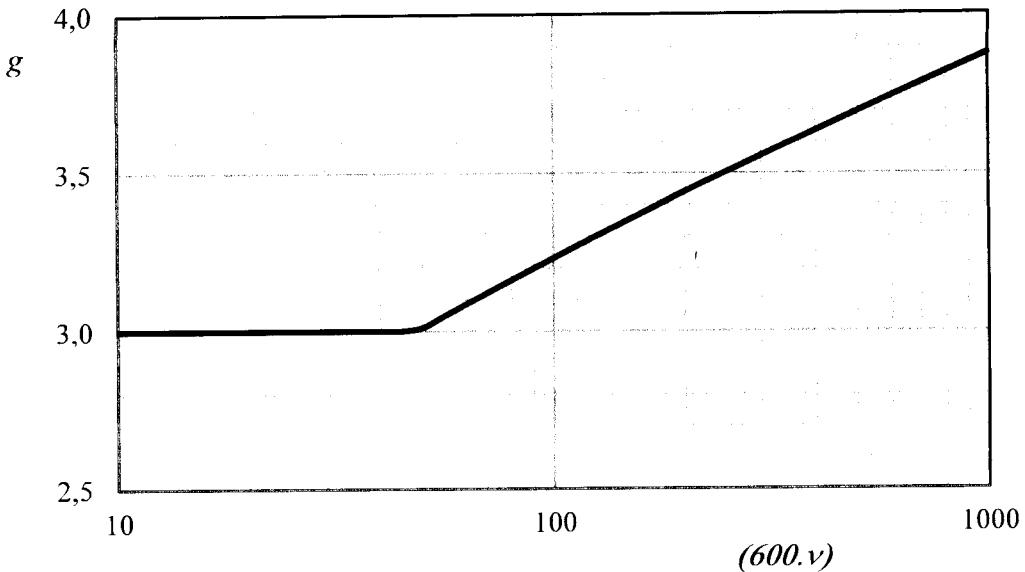


Figure 3.5 : Facteur de pointe

$$g = \sqrt{2 \times \ln(600 \times \nu)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \times \ln(600 \times \nu)}} \geq 3 \quad (3.11)$$

Où :

ν (en Hz) est la fréquence moyenne donnée par :

$$\nu = n_{1,x} \times \sqrt{\frac{R^2}{Q^2 + R^2}} \geq 0.08 \quad [\text{Hz}] \quad (3.12)$$

3.3.4. Fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale de flexion $n_{1,x}$ dans la direction x du vent peut être évaluée au moyen de toute méthode d'analyse structurale pourvu qu'elle soit convenablement justifiée. Certaines de ces méthodes sont données ci-après.

3.3.4.1. Structures en console comportant des masses concentrées

- Une expression permettant le calcul de la fréquence fondamentale est donnée par :

$$n_{1,x} = \frac{0,5}{\sqrt{f}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.13)$$

Avec f [en m] est la flèche de la structure dû au poids propre appliqué dans la

direction de vibration.

3.3.4.2. Bâtiments de grande hauteur

La fréquence fondamentale des bâtiments de grande hauteur ($h > 50\text{m}$) peut être déterminée par l'expression

$$n_{1,x} = \frac{46}{h} \quad [\text{Hz}] \quad (3.14)$$

Où h [en m] est la hauteur du bâtiment.

La même expression peut donner des indications sur la fréquence de tous les bâtiments.

3.3.4.3. Cheminées

La fréquence fondamentale des cheminées peut être estimée par :

$$n_{1,x} = \frac{f_m \times b}{h_{\text{eff}}^2} \times \sqrt{\frac{M_s}{M_t}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.15)$$

Avec

- h_{eff} (en m) est donnée par $h_{\text{eff}} = h_1 + h_2/3$ (voir figure 3.6) ;
- b (en m) est le diamètre en tête de la cheminée ;
- M_s (en kg) est la masse des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la cheminée ;
- M_t (en kg) est la masse totale de la cheminée ;
- f_m est un coefficient ; il est égal à 1000 pour les cheminées en acier, et 700 pour les cheminées en béton ou en maçonnerie.

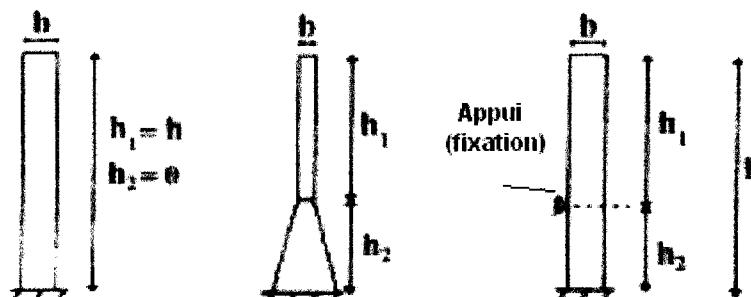


Figure 3.6 : Paramètres géométriques pour le calcul de la fréquence des cheminées

CHAPITRE 4**COEFFICIENTS DE FORCE****4.1. Formule générale**

Le coefficient de force C_f des constructions soumises à un vent perpendiculaire à l'une de leurs faces est donné par :

$$C_f = C_{f,0} \times \psi_\lambda \quad (4.1)$$

Où :

- $C_{f,0}$ est le coefficient de force des constructions en considérant un élancement effectif infini; les valeurs de $C_{f,0}$ sont données dans les paragraphes suivants pour différents types de construction ;
- ψ_λ est le facteur d'élancement défini en 4.1.1.

4.1.1. Facteur d'élancement

Le facteur d'élancement ψ_λ est donné par la figure 4.1 en fonction de l'élancement effectif λ_e (Cf. § 4.1.2) et pour différents coefficients de remplissage φ .

On prendra :

- $\varphi = 1$ pour les constructions fermées ;
- $\varphi = A/A_c$ pour les constructions en treillis où A (en m^2) est la somme des aires individuelles des éléments de la structure, c'est à dire la surface totale des pleins, et A_c (en m^2) est l'aire de la surface circonscrite à la construction dans un plan perpendiculaire à la direction du vent.

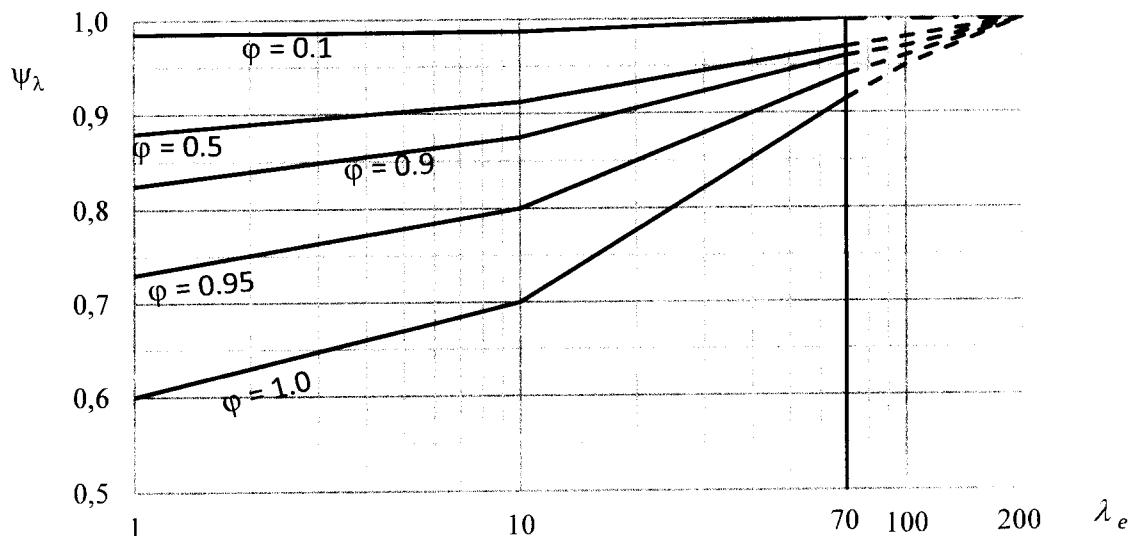
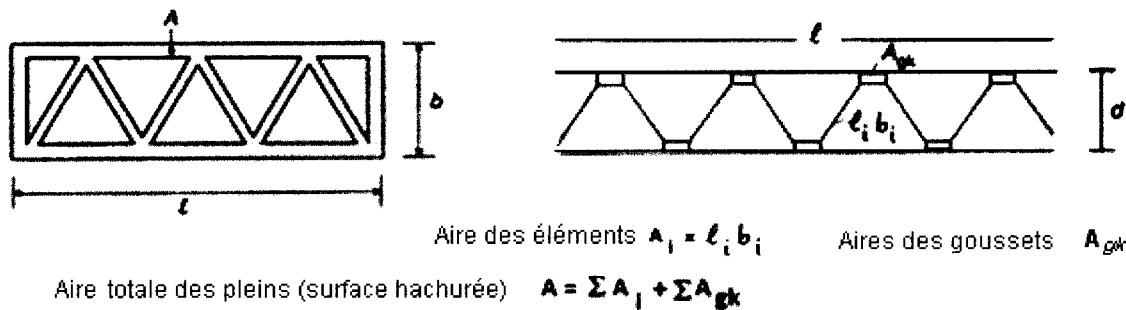


Figure 4.1 : Facteur d'élancement ψ_λ

Notes pour la figure 4.1

- Pour les valeurs intermédiaires de ψ_λ l'interpolation linéaire est admise.

Figure 4.2 : paramètres pour le calcul de ϕ .

4.1.2. Élancement effectif λ_e

A l'approche d'un corps solide, l'écoulement de l'air se divise pour le contourner. Moins il y a d'espace libre autour du corps, plus celui-ci offre de résistance à l'écoulement. L'élancement effectif λ_e caractérise cet espace libre.

4.1.2.1. Les formules donnant l'élancement effectif λ_e sont présentées dans le tableau 4.1.

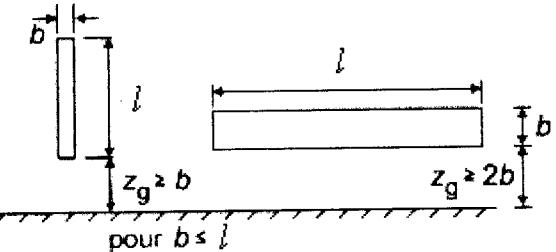
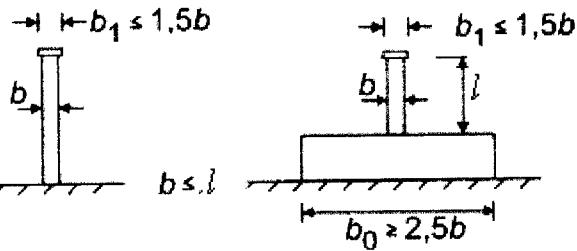
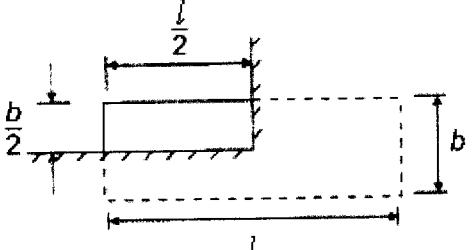
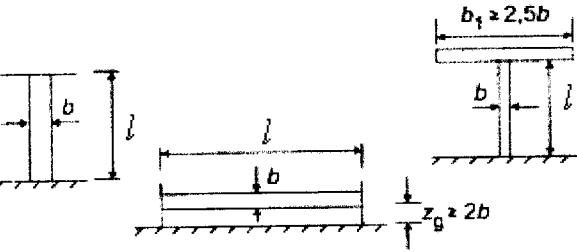
Position dans l'espace de la construction, vent normal au plan de l'élément	λ_e
	<ul style="list-style-type: none"> Pour les sections polygonales, rectangulaires et arêtes vives et pour les structures en treillis : <p>Pour $l \geq 50$ m,</p> $\lambda_e = \text{Min} (1.4 \frac{l}{b}; 70)$
	<ul style="list-style-type: none"> Pour les cylindres à base circulaires <p>Pour $l \geq 50$ m,</p> $\lambda_e = \text{Min} (0.7 \frac{l}{b}; 70)$
	<p>Nota : pour les valeurs intermédiaires de (l) il convient d'utiliser les valeurs intermédiaires.</p>
	<p>Pour $l \geq 50$ m,</p> $\lambda_e = \text{Max} (0.7 \frac{l}{b}; 70)$ <p>Pour $l < 15$ m,</p> $\lambda_e = \text{Max} (\frac{l}{b}; 70)$ <p>Nota : pour les valeurs intermédiaires de (l) il convient d'utiliser les valeurs intermédiaires.</p>

Tableau 4.1 : Élancement effectif λ_e

4.1.2.2. Afin de déterminer l'élancement effectif λ_e (voir tableau 4.1) on prendra pour b :

- le diamètre du cylindre pour les constructions à base circulaire;
- le diamètre de la circonference circonscrite pour les constructions à base polygonale (voir figure 4.4).

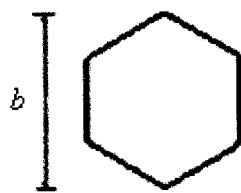


Figure 4.3 : Section polygonale régulière

4.2. Construction et éléments structuraux à section rectangulaire

4.2.1. Le coefficient $C_{f,0}$ des constructions à base rectangulaire à angles vifs est donné par la figure 4.4.

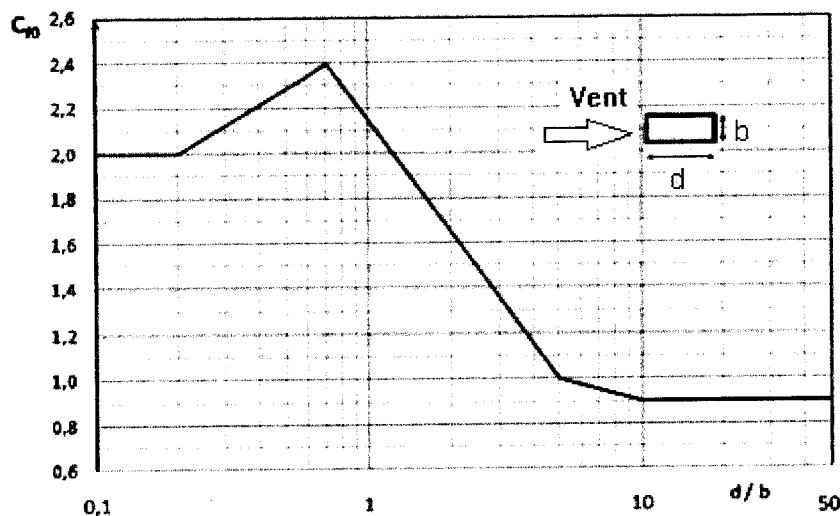
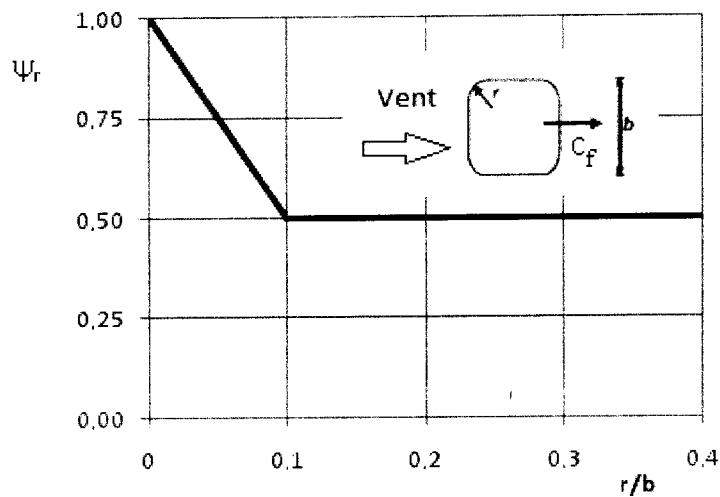


Figure 4.4 : Coefficient $C_{f,0}$ des constructions à base rectangulaire à angles vifs

4.2.2. Un facteur de correction ψ_r du coefficient de force est appliqué dans le cas des constructions à base rectangulaire à angles arrondis. Il est donné par la figure 4.5 en fonction du rapport r/b .

Avec :

- r (en m) étant le rayon de courbure de l'angle arrondi ;
- b (en m) étant la dimension perpendiculaire à la direction du vent.

Figure 4.5 : Facteur de réduction ψ_r .

4.3. Constructions et éléments structuraux à base polygonale régulière

Le coefficient de force $C_{f,0}$ des constructions à base polygonale régulière est donné dans le tableau 4.2 en fonction du type de section et du paramètre $b \times \sqrt{q_p}$ avec :

- b (en m) le diamètre de la surface circonscrite à la hauteur z considérée ;
- q_p (en N/m²) la pression de pointe à la hauteur z considérée.

Sections	Conditions de surface et angles	$b \times \sqrt{q_p}$	$C_{f,0}$
Pentagone (5 cotés)	quelconque	quelconque	1,8
Hexagone (6 cotés)	quelconque	quelconque	1,6
Octogone (8 cotés)	$r/b < 0,075$	$\leq 2,79$ $\geq 3,49$	1,45 1,3
	$r/b \geq 0,075$	$\leq 2,32$ $\geq 8,14$	1,3 1,1
Décagone (10 cotés)	quelconque	quelconque	1,3
Dodécagone (12 cotés)	quelconque	$\leq 4,65$ $> 4,65$	1,3 1,1

Tableau 4.2 : Coefficient de force $C_{f,0}$ des sections polygonales

Notes pour le tableau 4.2

- r désigne le rayon au sommet, b le diamètre ;
- pour les valeurs intermédiaires de $b \times \sqrt{q_p}$, on interpolera linéairement.

4.4. Constructions et éléments structuraux à base circulaire

4.4.1. Pour les constructions à base circulaire situées près d'une surface plane et pour lesquels le rapport des distances z_g/b est inférieur à 1,5 (voir figure 4.6), il y a lieu de consulter des spécialistes.

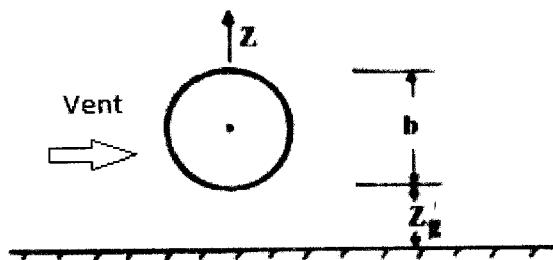


Figure 4.6 : Cylindre situé près d'une surface plane

4.4.2. Pour les constructions reposant sur le sol, et celles pour lesquelles le rapport des distances z_g/b est supérieur à 1,5, le coefficient de force $C_{f,0}$ est donné par la figure 4.7 en fonction :

- de la rugosité équivalente donnée dans le tableau 4.3,
- du paramètre $b \times \sqrt{q_p}$ avec :
 - b (en m) le diamètre du cylindre à la hauteur z considérée ;
 - q_p (N/m^2) la pression de pointe à la hauteur z considérée.

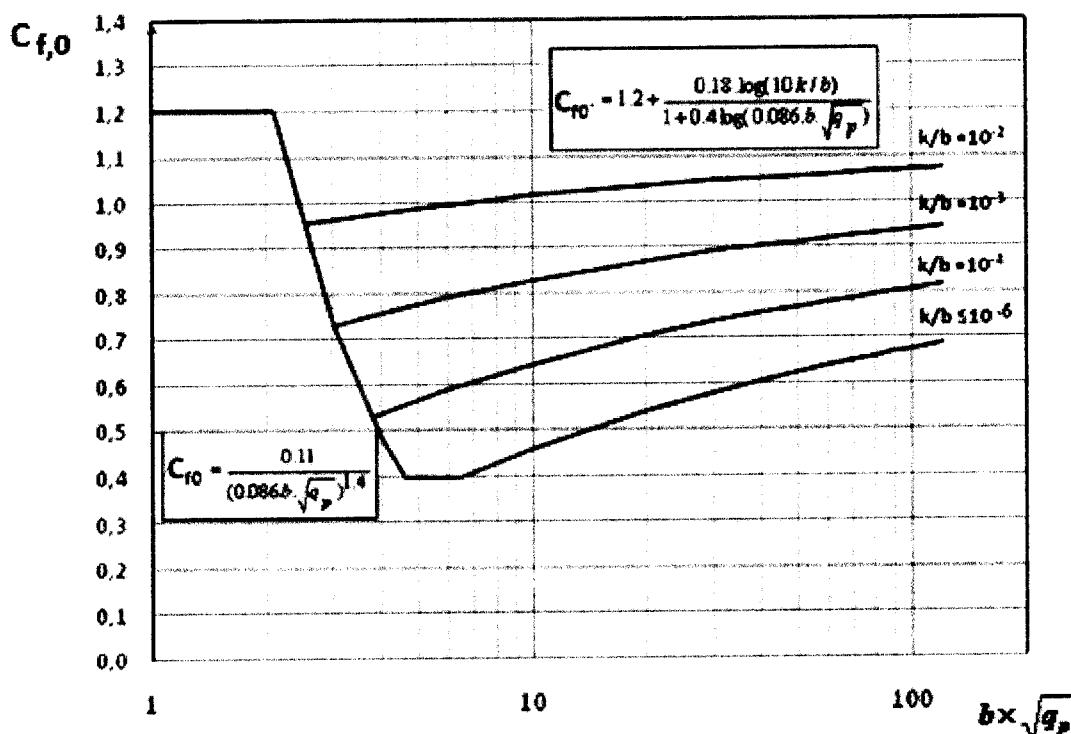


Figure 4.7 : $C_{f,0}$ des cylindres à base circulaire pour différentes rugosités relatives k/b

Type de surface	Rugosité équivalente k (mm)
Verre	0,0015
Métal poli	0,002
Peinture lisse	0,006
Peinture appliquée au pistolet	0,02
Acier (produits clairs)	0,05
Fonte	0,2
Acier galvanisé	0,2
Béton lisse	0,2
Bois raboté	0,5
Béton brut	1,0
Bois brut	2,0
Rouille	2,0
Maçonnerie de brique	3,0

Tableau 4.3 : Rugosité équivalente k

4.4.3 L'aire de référence A_{ref} des constructions à base circulaire est déterminée par l'équation 4.2 :

$$A_{ref} = l_{el} \times b \quad (4.2)$$

Où :

- l_{el} est la longueur de l'élément structural considéré ;
- b est le diamètre.

4.5. Structures en treillis

4.5.1. Le coefficient de force $C_{f,0}$ d'une structure plane en treillis composée d'éléments à angles vifs ou d'éléments cylindriques est donné par le tableau 4.4 en fonction du coefficient de remplissage φ (Cf. § 4.1.1)

Coefficient de remplissage	Élément à angles vifs	Éléments cylindriques	
		$b \times \sqrt{q_p} < 5.3$	$b \times \sqrt{q_p} > 5.3$
$\varphi < 0.1$	2	1.2	0.8
$0.1 \leq \varphi < 0.225$	1.8	1.3	0.9
$0.225 \leq \varphi < 0.9$	1.6	1.5	1.1
$\varphi \geq 0.9$	2	1.5	1.1

Tableau 4.4 : Coefficients de forces $C_{f,0}$ des treillis plans

4.5.2. Le coefficient de force $C_{f,0}$ d'une structure spatiale en treillis composé d'éléments à angles vifs est donnée par le tableau 4.5 en fonction du coefficient de remplissage φ (Cf. § 4.1.1)

Forme de la section		$C_{f,0}$
Carrée		$4.0\varphi^2 - 5.9\varphi + 4$
Triangulaire		$3.4\varphi^2 - 4.7\varphi + 3.4$

Tableau 4.5 : Coefficients de forces $C_{f,0}$ d'une structure en treillis spatial

Note pour le tableau 4.5

- La direction du vent à considérer est celle qui conduit aux efforts et réactions maximaux dans les éléments. Pour les treillis carrés, et lorsque la direction du vent est selon la diagonale, le coefficient de force doit être multiplié par le facteur $1+0.75\varphi$ sans pour autant dépasser la valeur 1.2,

4.5.3. Le coefficient de force $C_{f,0}$ d'une structure spatiale en treillis composé d'éléments cylindriques est obtenu en multipliant les valeurs du tableau 4.5 par le facteur de réduction $0.51\varphi^2 + 0.57$ mais sans pour autant dépasser la valeur 1.

4.5.4. Pour les structures en treillis comportant des équipements annexes non structuraux tels que pylônes avec paraboles, échelles et autres équipements le coefficient de force est déterminé comme suit :

- Lorsque les équipements annexes sont disposés de manière symétrique par rapport à toutes les faces, leurs surfaces effectives projetées doivent être ajoutées aux surfaces des éléments du treillis ;
- Lorsque les équipements annexes ne sont pas placés symétriquement le coefficient de force global est déterminé par l'expression :

$$C_f = C_{f,0,S} + \sum C_{f,A} \times \frac{A_a}{A_s} \quad (4.3)$$

Avec:

- $C_{f,0,S}$ est le coefficient de force du tronçon considéré du treillis ;
- $C_{f,A}$ est le coefficient de force de l'équipement annexe considéré, donné par le tableau 4.6 ;
- A_a est L'aire projetée de l'équipement annexe ;
- A_s est L'aire totale projetée sur une face du tronçon considéré.

Type d'élément	Rapport de forme ≤ 7	Rapport de forme ≥ 25
A angles vifs	1.4	2.0
cylindrique	0.8	1.2

Tableau 4.6 : Coefficients de forces $C_{f,A}$ des équipements annexes

Notes pour le tableau 4.6

- Le rapport de forme est le rapport de la longueur totale de l'élément divisé par sa largeur dans un plan ;
- Une interpolation linéaire peut être utilisée pour des valeurs intermédiaires du rapport de forme.

4.5.5. Lorsque l'action du givre doit être considérée, une accumulation uniforme sur toutes les surfaces peut être supposée (voir figure 4.8). L'aire projetée additionnelle due au givre peut être considérée cylindrique même dans le cas des éléments à angles vifs.

La valeur de l'épaisseur (t) doit être définie dans les documents contractuels.

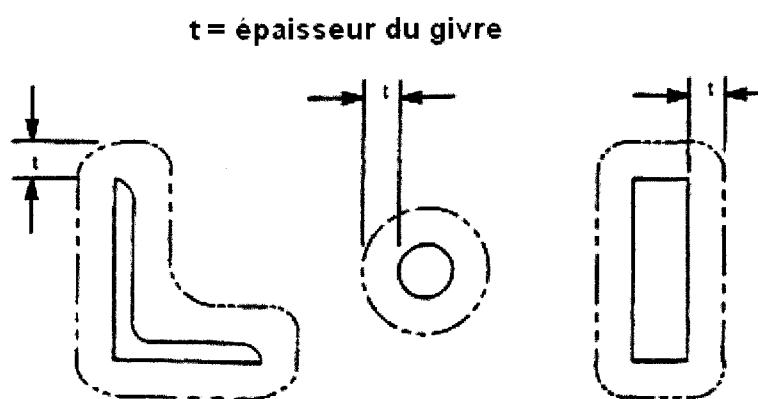


Figure 4.8 : prise en compte du givre

4.6. Profilés à angle vifs

Le coefficient de force $C_{f,0}$ des profilés, pour les deux directions du vent, est pris égal à 2 (des exemples de profilés sont donnés dans la figure 4.9).

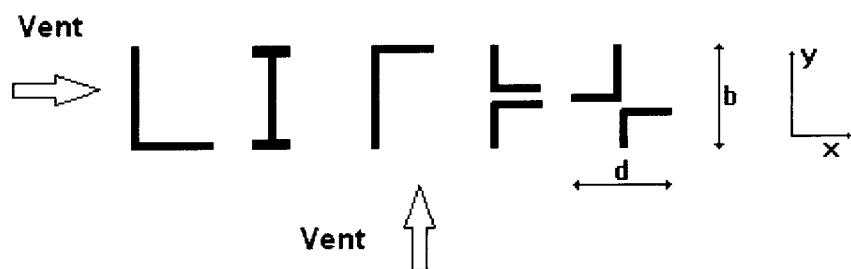


Figure 4.9 : Profilés à angles vifs

4.7. Cas des structures en forme de sphère

4.7.1 Dans le cas où $z_g > b/2$ (voir fig. 4.10) le coefficient de force C_f des constructions en forme de sphère, dans la direction du vent, est donnée par la figure 4.11.

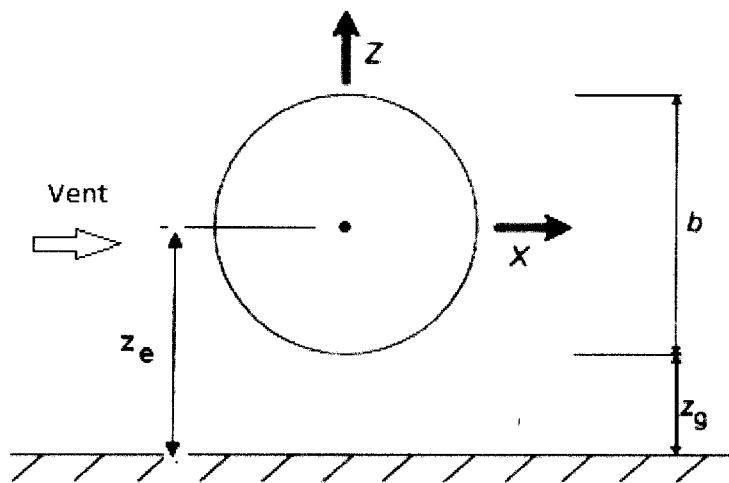
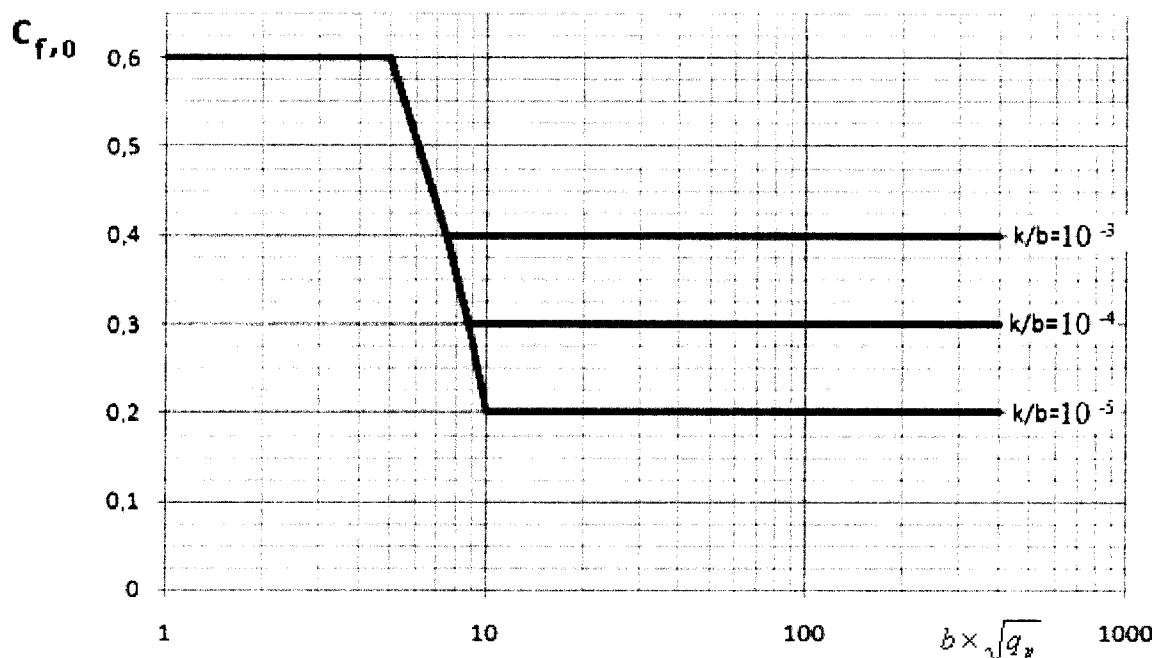


Figure 4.10 : sphère située près d'une surface plane

Figure 4.11 : $C_{f,0}$ des sphères pour différentes rugosités relatives k/b

4.7.2 Dans le cas où $z_g < b/2$ le coefficient de force donné par la figure 4.11 doit être multiplié par 1.6.

4.7.3 Le coefficient de force dans la direction verticale est donné par :

- $C_{fz}=0$ pour $z_g \geq b/2$
- $C_{fz}=0.6$ pour $z_g < b/2$

4.7.4 Dans les deux cas l'aire de référence et la hauteur de référence sont respectivement données par :

$$A_{ref}=\pi b^2/4 \quad z_e=z_g+b/2$$

4.8. Cas des drapeaux

Le coefficient de force C_f des drapeaux est donné par :

$$\begin{cases} C_f = 1.8 & \text{Cas des drapeaux fixes (type banderoles)} \\ C_f = 0.02 + 0.7 \times \frac{m_f}{\rho \cdot h} \left(\frac{A_{ref}}{h^2} \right)^{-1.25} & \text{Cas des drapeaux libres (avec effet de flottement)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air = 1.2 kg/m³ ;

m_f : (en kg/m²) masse par unité d'aire du drapeau ;

h : Hauteur nette du drapeau (voir figure 4.12);

A_{ref} : Surface de référence donnée par la figure 4.12.

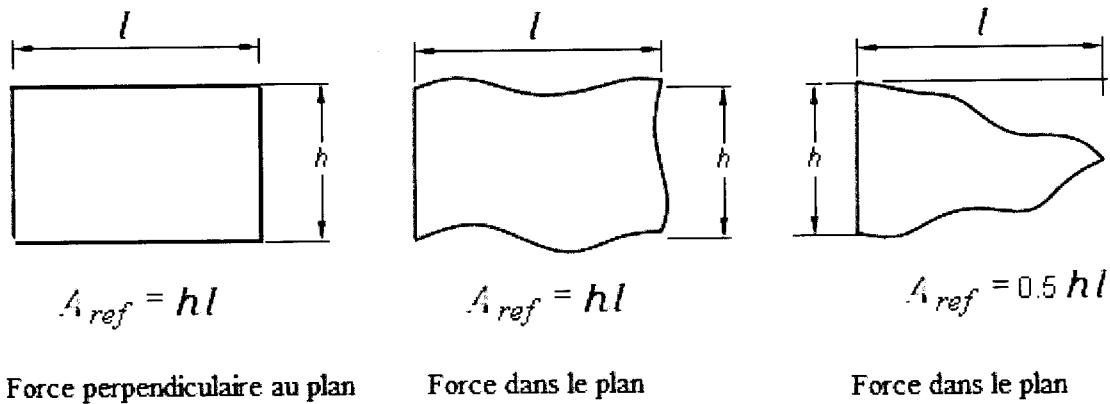


Figure 4.12 : Surface de référence pour les drapeaux

CHAPITRE 5**COEFFICIENTS DE PRESSION****5.1. Coefficients de pression extérieure****5.1.1. Constructions à base rectangulaire**

5.1.1.1. Les coefficients de pression extérieure C_{pe} des constructions à base rectangulaire et de leurs éléments constitutifs individuels dépendent de la dimension de la surface chargée. Ils sont définis pour des surfaces chargées de 1m^2 et 10m^2 , auxquelles correspondent les coefficients de pression notés respectivement $C_{pe,1}$ et $C_{pe,10}$.

5.1.1.2. C_{pe} s'obtient à partir des formules suivantes :

$$\begin{aligned} C_{pe} &= C_{pe,1} && \text{si : } S \leq 1 \text{ m}^2 \\ C_{pe} &= C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) \times \log_{10} (S) && \text{si: } 1 \text{ m}^2 < S < 10 \text{ m}^2 \\ C_{pe} &= C_{pe,10} && \text{si : } S \geq 10 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

où S (en m^2) désigne la surface chargée de la paroi considérée.

5.1.2. Parois verticales

Il convient de diviser les parois comme l'indique la figure 5.1. Les valeurs de $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$ sont données dans le tableau 5.1.

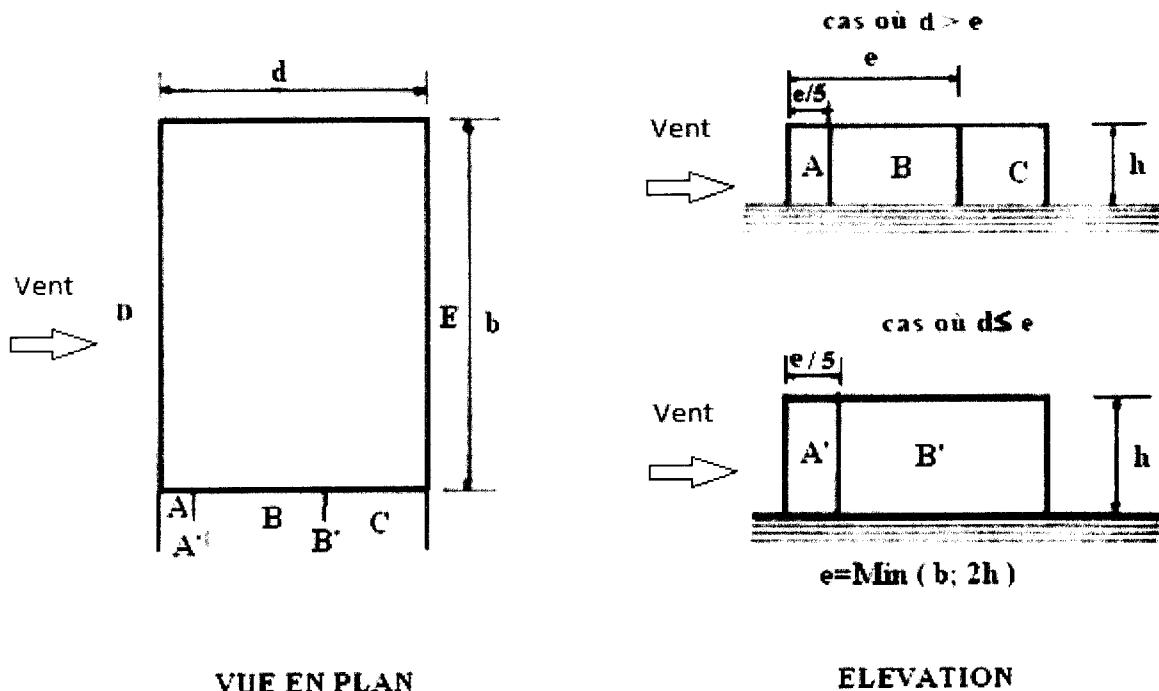


Figure 5.1 : Légende pour les parois verticales

Paroi latérale				Paroi au vent		paroi sous le vent			
A, A'		B, B'		C		D		E	
$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
- 1,0	- 1,3	- 0,8	- 1,0		- 0,5		+ 0,8	1,0	- 0,3

Tableau 5.1 : C_{pe} pour les parois verticales de bâtiments à base rectangulaire

5.1.3. Toitures plates

Les toitures plates sont celles dont l'angle de la pente est inférieur ou égal à 5°.

Il convient de diviser la toiture comme l'indique la figure 5.2. Les coefficients $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$ sont donnés dans le tableau 5.2.

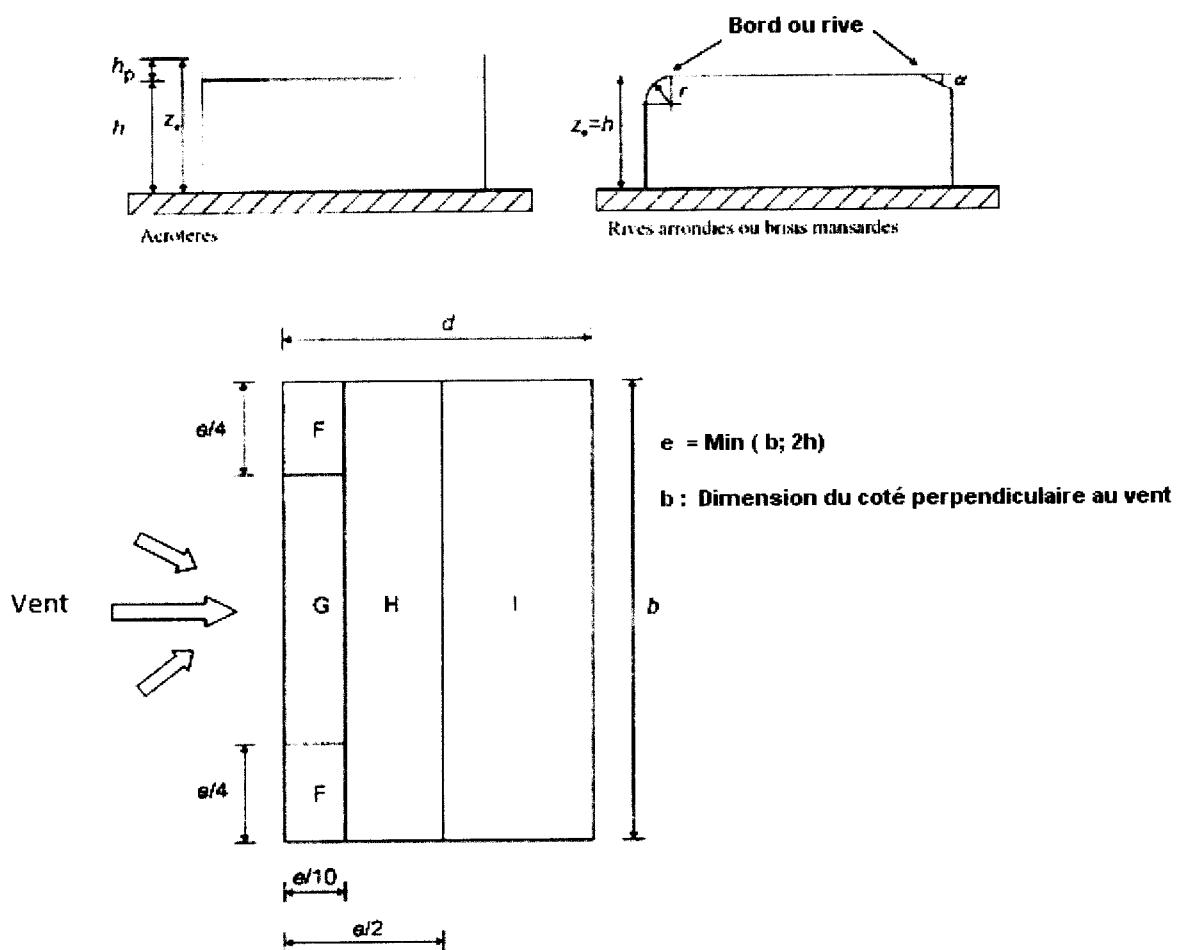


Figure 5.2 : Légende pour les toitures plates

		Zones							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
arêtes vives (sans acrotères)		- 1,8	- 2,5	- 1,2	- 2,0	- 0,7	- 1,2	$\pm 0,2$	
avec acrotères	$h_p/h = 0,025$	- 1,6	- 2,2	- 1,1	- 1,8	- 0,7	- 1,2	$\pm 0,2$	
	$h_p/h = 0,05$	- 1,4	- 2,0	- 0,9	- 1,6	- 0,7	- 1,2	$\pm 0,2$	
	$h_p/h = 0,10$	- 1,2	- 1,8	- 0,8	- 1,4	- 0,7	- 1,2	$\pm 0,2$	
rives arrondies	$r/h = 0,05$	- 1,0	- 1,5	- 1,2	- 1,8	$- 0,4$		$\pm 0,2$	
	$r/h = 0,10$	- 0,7	- 1,2	- 0,8	- 1,4	$- 0,3$		$\pm 0,2$	
	$r/h = 0,20$	- 0,5	- 0,8	- 0,5	- 0,8	$- 0,3$		$\pm 0,2$	
brisis mansardés	$\alpha = 30^\circ$	- 1,0	- 1,5	- 1,0	- 1,5	$- 0,3$		$\pm 0,2$	
	$\alpha = 45^\circ$	- 1,2	- 1,8	- 1,3	- 1,9	$- 0,4$		$\pm 0,2$	
	$\alpha = 60^\circ$	- 1,3	- 1,9	- 1,3	- 1,9	$- 0,5$		$\pm 0,2$	

Tableau 5.2 : Coefficients de pression extérieure des toitures plates

Notes pour le tableau 5.2

- Pour les toitures avec acrotères ou rives arrondies, une interpolation linéaire peut être faite pour les valeurs intermédiaires de h_p/h et r/h ;
- Pour les toitures à brisis mansardés, l'interpolation linéaire est admise entre $\alpha = 30^\circ$, 45° et $\alpha = 60^\circ$. Pour $\alpha > 60^\circ$, l'interpolation linéaire est faite entre les valeurs de $\alpha = 60^\circ$ et celles correspondant à des toitures plates à arêtes vives ;
- En zone I, où les valeurs indiquées sont positives et négatives, chacune des valeurs doit être considérée ;
- Pour le brisis mansardé lui-même, les coefficients de pression externe sont donnés par le tableau 5.4 "Coefficients de pression externe pour toitures à deux versants direction du vent : $\theta = 0^\circ$ ", zones F et G, en fonction de l'angle du brisis ;
- Pour la rive arrondie elle-même, les coefficients de pression externe sont déterminés par interpolation linéaire le long de l'arrondi, entre les valeurs de la paroi verticale et celles de la toiture.

5.1.4. Toitures inclinées à un versant

5.1.4.1. La direction du vent est définie par un angle θ (voir figure 5.3) :

- $\theta = 0^\circ$ correspond à un vent dont la direction est perpendiculaire aux génératrices et frappant la rive basse de la toiture (fig. 5.3.a) ;
- $\theta = 180^\circ$ correspond à un vent dont la direction est perpendiculaire aux génératrices et frappant la rive haute de la toiture (fig. 5.3.b) ;
- $\theta = 90^\circ$ correspond à un vent dont la direction est parallèle aux génératrices (fig. 5.3.c).

5.1.4.2. Il convient de diviser la toiture comme l'indique la figure 5.3. Les coefficients $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$ sont donnés dans le tableau 5.3.

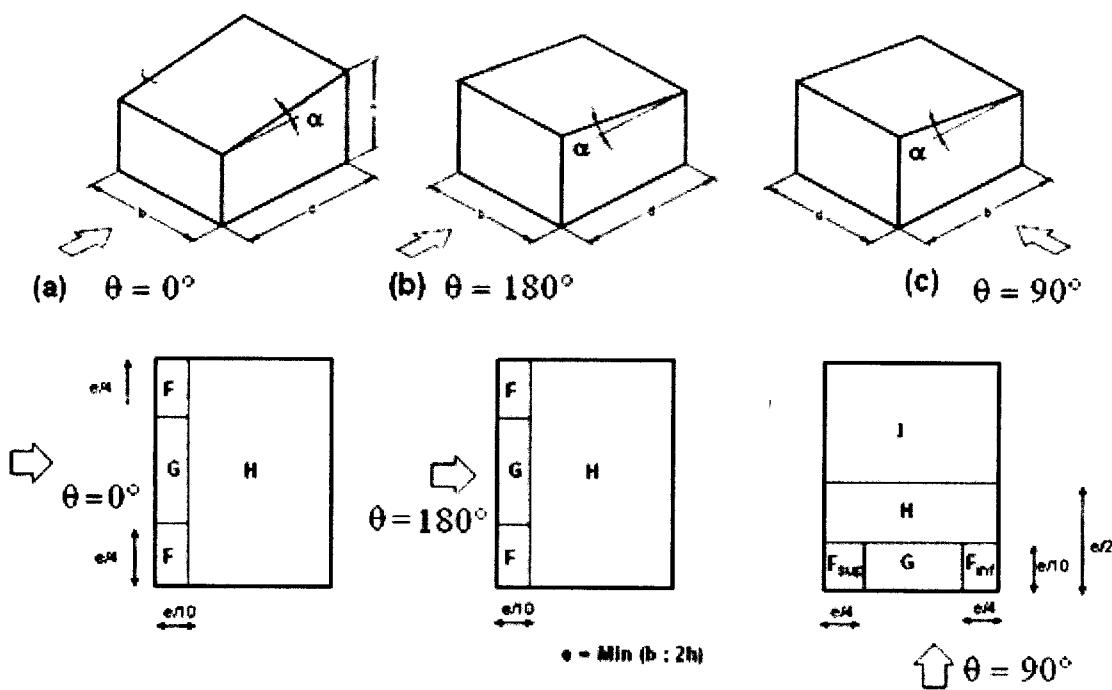


Figure 5.3 : Légende pour les toitures à un versant

Angle de Pente α	Zones pour vents de direction $\theta = 0^\circ$						Zones pour vents de direction $\theta = 180^\circ$					
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	- 1,7	- 2,5	- 1,2	- 2,0	- 0,6	- 1,2	- 2,3	- 2,5	- 1,3	- 2,0	- 0,8	- 1,2
	+ 0,0		+ 0,0		+ 0,0							
15°	- 0,9	- 2,0	- 0,8	- 1,5	- 0,3		- 2,5	- 2,8	- 1,3	- 2,0	- 0,9	- 1,2
	+ 0,2		+ 0,2		+ 0,2							
30°	- 0,5	- 1,5	- 0,5	- 1,5	- 0,2		- 1,1	- 2,3	- 0,8	- 1,5	- 0,8	- 0,8
	+ 0,7		+ 0,7		+ 0,7							
45°	0,0		0,0		0,0		- 0,6	- 1,3	- 0,5	-	- 0,7	
	+ 0,7		+ 0,7		+ 0,6							
60°	+ 0,7		+ 0,7		+ 0,7		- 0,5	- 1,0	- 0,5		- 0,5	
	+ 0,8		+ 0,8		+ 0,8							
75°							- 0,5	- 1,0	- 0,5		- 0,5	

Tableau 5.3.a : Coefficients de pression extérieure pour toitures à un versant

Vent de direction $\theta = 0^\circ$ et 180°

Angle de Pente α	Zones pour vent de direction $\theta = 90^\circ$							
	F _{sup}		F _{inf}		G		H	
	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}
5°	-2,1	-2,6	-2,1	-2,4	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2
15°	-2,4	-2,9	-1,6	-2,4	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2
30°	-2,1	-2,9	-1,3	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3
45°	-1,5	-2,4	-1,3	-2,0	-1,4	-2,0	-1,0	-1,3
60°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3
75°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3

Tableau 5.3.b : Coefficients de pression extérieure pour toitures à un versant

Vent de direction $\theta = 90^\circ$

Notes pour les tableaux 5.3.a et 5.3.b.

- Pour $\theta = 0^\circ$, la pression passe rapidement de valeurs positives à des valeurs négatives pour des pentes α de l'ordre de 5° à 45° . C'est la raison pour laquelle des valeurs positives et négatives sont données pour ces pentes. Pour ces toitures, il convient de prendre en considération deux cas : un cas présentant toutes les valeurs positives, et un cas présentant toutes les valeurs négatives. Il n'est pas admis dans le cas des toitures à un versant de prendre des valeurs positives et négatives en même temps.
- Pour les pentes intermédiaires, l'interpolation linéaire entre valeurs de même signe est admise. Les valeurs égales à 0,0 sont données à cette fin d'interpolation..

5.1.5. Toitures à deux versants

5.1.5.1. La direction du vent est définie par un angle θ (voir figure 5.4) :

- $\theta = 0^\circ$ pour un vent dont la direction est perpendiculaire aux génératrices;
- $\theta = 90^\circ$ pour un vent dont la direction est parallèle aux génératrices.

5.1.5.2. Il convient de diviser la toiture comme indiqué sur la figure 5.4. Les coefficients de pression $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$ sont donnés dans le tableau 5.4.

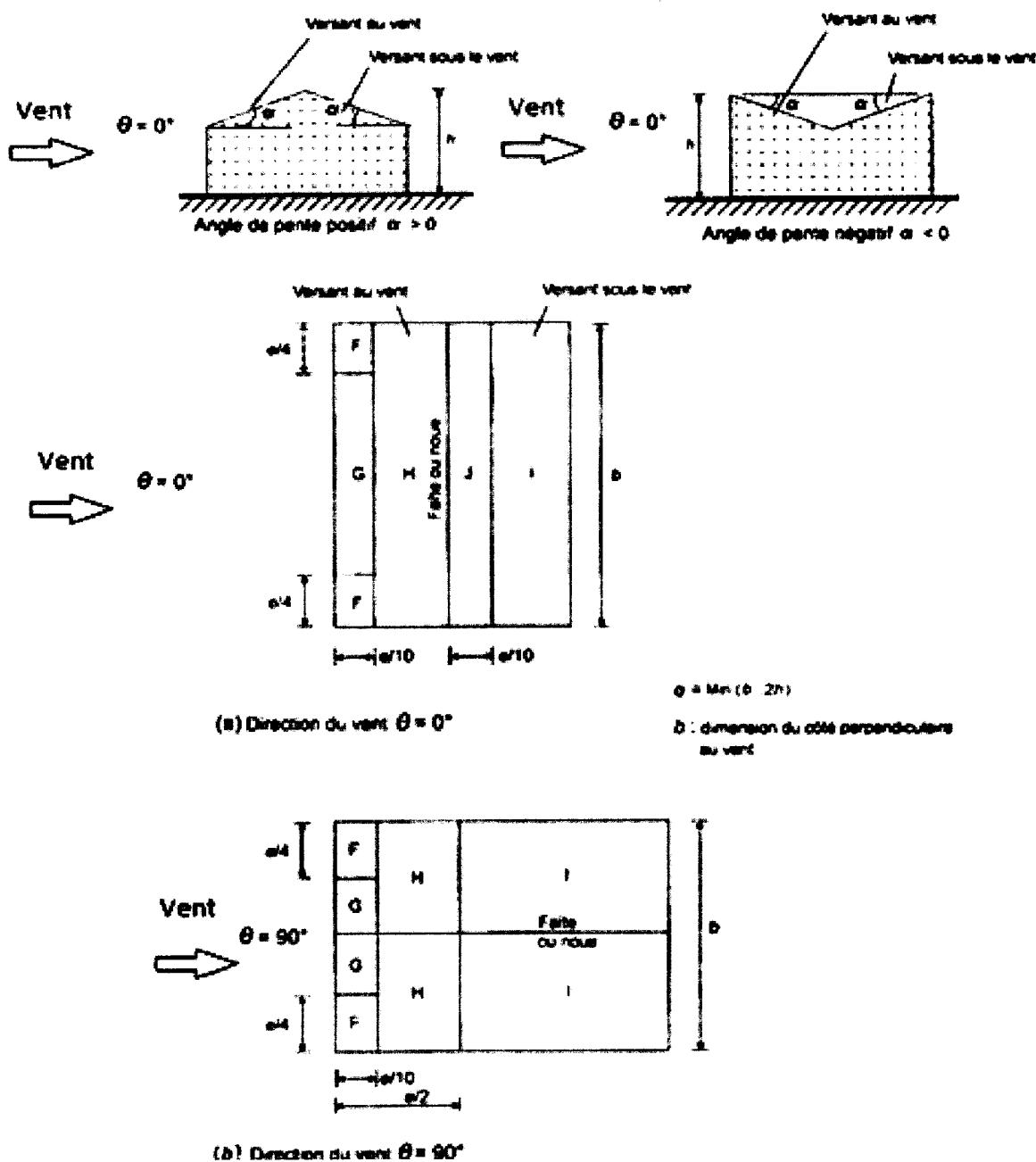


Figure 5.4 : Légende pour les toitures à deux versants

Angle de pente α	Zones pour vent de direction $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2	+0,2		
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6	-0,6		
	+0,0		+0,0		+0,0		-0,6	+0,2		-0,6
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4	-1,0		-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0	0,0		0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4	-0,5		
	0,7		0,7		0,4		0,0	0,0		
45°	0,0		0,0		0,0		-0,2	-0,3		
	+0,7		+0,7		+0,6		0,0	0,0		
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2	-0,3		
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2	-0,3		

Angle de pente α	Zones pour vent de direction $\theta = 90^\circ$								
	F		G		H		I		
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2	
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2	
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2	
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2	
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6		
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5		
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5		
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5		
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5		

Tableau 5.4 : Coefficients de pression extérieure pour toitures à deux versants

Notes pour le tableau 5.4

- Quand $\theta = 0^\circ$, la pression passe rapidement de valeurs positives à des valeurs négatives pour des pentes α de l'ordre de 15° à 30° . C'est la raison pour laquelle des valeurs positives et négatives sont données ;

- Pour les pentes intermédiaires de même signe, l'interpolation linéaire entre valeurs de même signe est admise (ne pas interpoler entre $\alpha = + 5^\circ$ et $\alpha = - 5^\circ$ mais exploiter les données concernant les toitures plates, cf. § 5.1.3) ;
- Pour les toitures dissymétriques, les coefficients de pression sont toujours déterminés par la pente du versant au vent.

5.1.6. Toitures à quatre versants

5.1.6.1. La direction du vent est définie par un angle θ (voir figure 5.5) :

- $\theta = 0^\circ$ pour un vent dont la direction est perpendiculaire au faîtiage ;
- $\theta = 90^\circ$ pour un vent dont la direction est parallèle au faîtiage.

5.1.6.2. Il convient de diviser la toiture comme indiqué sur la figure 5.5. Les valeurs de $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$ sont donnés dans le tableau 5.5.

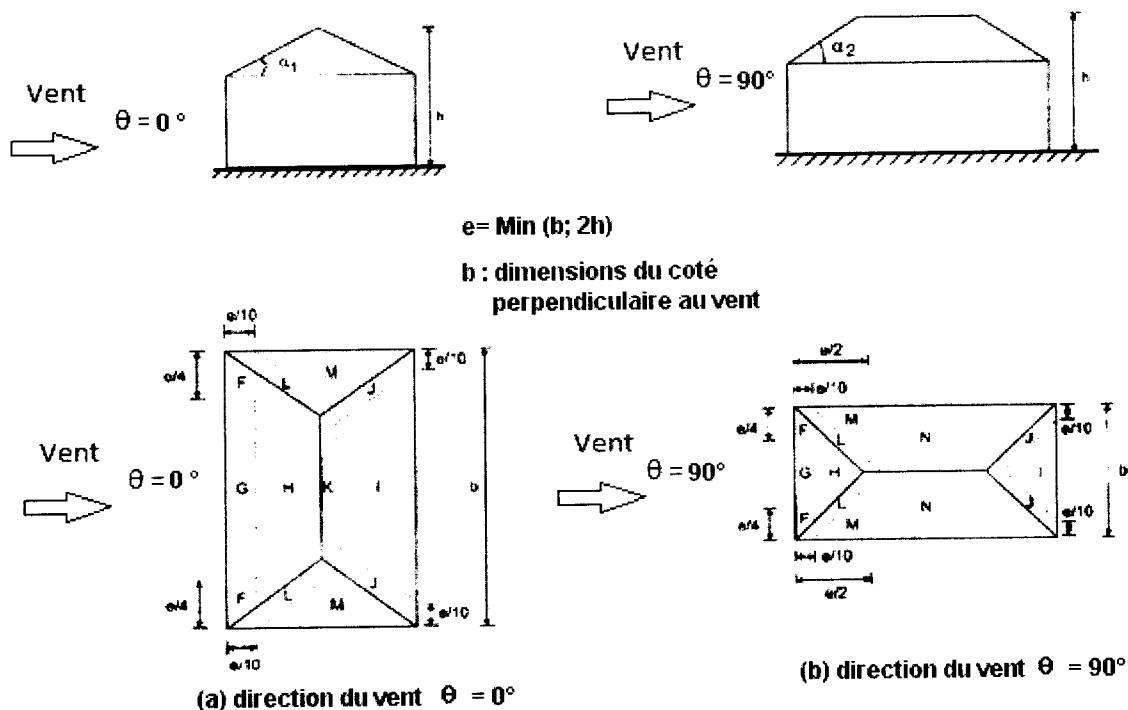


Figure 5.5 : Légende pour les toitures à quatre versants

Angle de pente α	Zones pour vent de direction $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$																	
	F		G		H		I		J		K		L		M		N	
$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	
$+5^\circ$	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	0,0	0,0	-0,3	-0,6	-0,6	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-1,2	-0,4	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0												
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-0,2	+0,2	+0,2	-0,5	-1,0	-1,5	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3
	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2												
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2	-0,2	0,5	0,7	-0,4	-0,7	-1,2	-0,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	
	0,5	0,5	0,7	0,4	0,4	0,4												
45°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+0,7	+0,7	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	
	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,6	+0,6												
60°	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-1,2	-2,0	-0,4	-0,2	-0,2	
	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8												
75°	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,3	-1,2	-2,0	-0,4	-0,2	-0,2	
	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3												

Tableau 5.5 : Coefficients de pression extérieure des toitures à quatre versants

Notes pour le tableau 5.5

- Quand $\theta = 0^\circ$ la pression passe rapidement des valeurs positives aux valeurs négatives sur le versant au vent pour des pentes de l'ordre de $+15^\circ$ à $+30^\circ$; c'est la raison pour laquelle les valeurs positives et négatives sont données ;
- Pour les pentes intermédiaires de même signe, l'interpolation linéaire, entre valeurs de même signe, est admise (ne pas interpoler entre $\alpha = +5^\circ$ et $\alpha = -5^\circ$ mais exploiter les données du paragraphe 1.1.3, concernant les toitures plates) ;
- Les coefficients de pression sont toujours déterminés par la pente du versant au vent.

5.1.7. Toitures à redans (shed)

5.1.7.1. Pour un vent dont la direction est parallèle aux génératrices, les coefficients de pression de chaque versant des toitures à redans s'obtiennent en utilisant les valeurs des toitures inclinées à un versant pour $\theta = 90^\circ$ (Cf. § 5.1.4).

5.1.7.2. Pour un vent dont la direction est perpendiculaire aux génératrices, on prendra les valeurs de C_{pe} des toitures inclinées à un versant modifiées pour leur position selon la figure 5.6a et 5.6b selon le signe de C_{pe} .

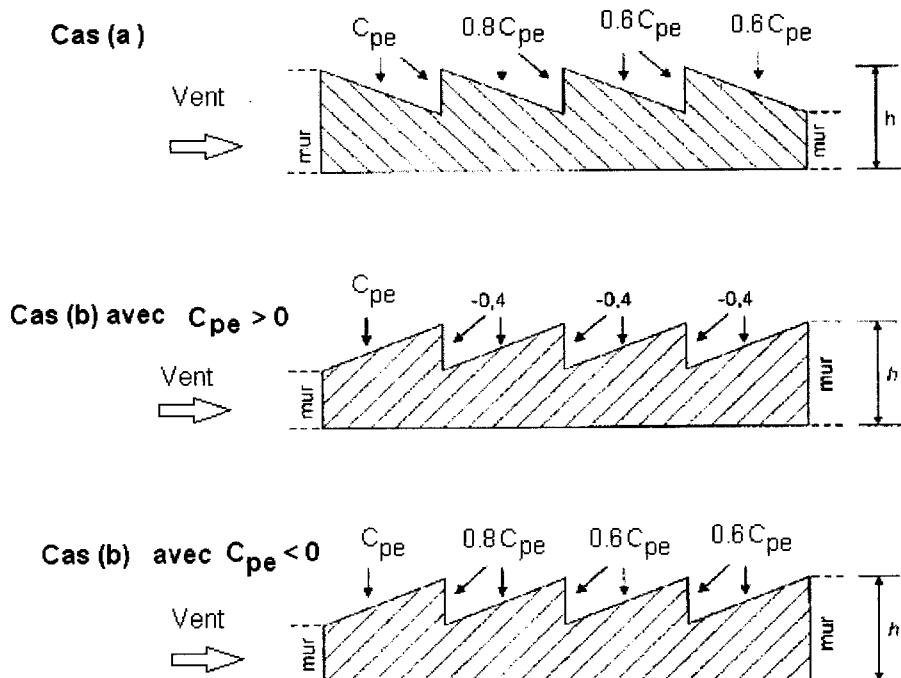


Figure 5.6 : Légende pour les toitures à redans

5.1.8. Toitures à versants multiples

5.1.8.1. Pour un vent dont la direction est parallèle aux génératrices, les coefficients de pression de chaque versant s'obtiennent en utilisant les valeurs des toitures à un versant pour $\theta = 90^\circ$ (Cf. § 5.1.4).

5.1.8.2. Pour un vent dont la direction est perpendiculaire aux génératrices, on prendra les valeurs de C_{pe} des toitures à deux versants pour $\alpha < 0^\circ$ (Cf. 5.1.5) modifiées pour leur position selon la figure 5.7.a et 5.7b :

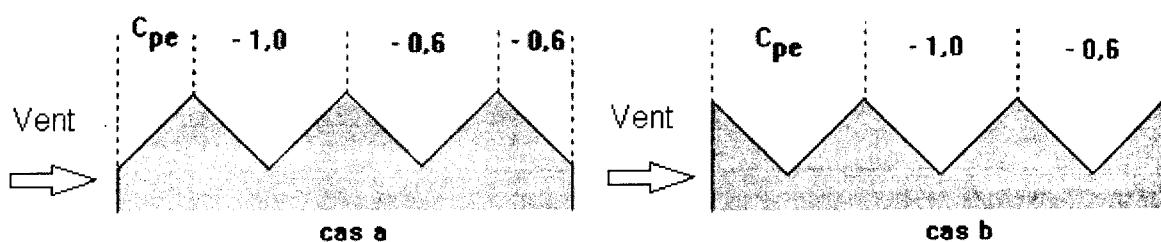
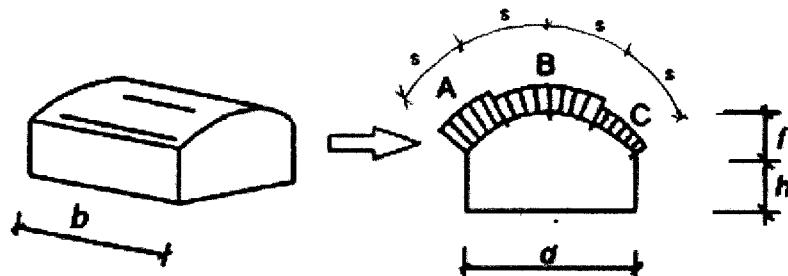


Figure 5.7 : Légende pour les toitures à versants multiples

5.1.9. Toitures en forme de voûte

5.1.9.1. Pour un vent perpendiculaire aux génératrices, les coefficients de pression sont donnés sur la figure 5.8.b. Il convient de diviser la toiture comme l'indique la figure 5.8.a.



(5.8.a)

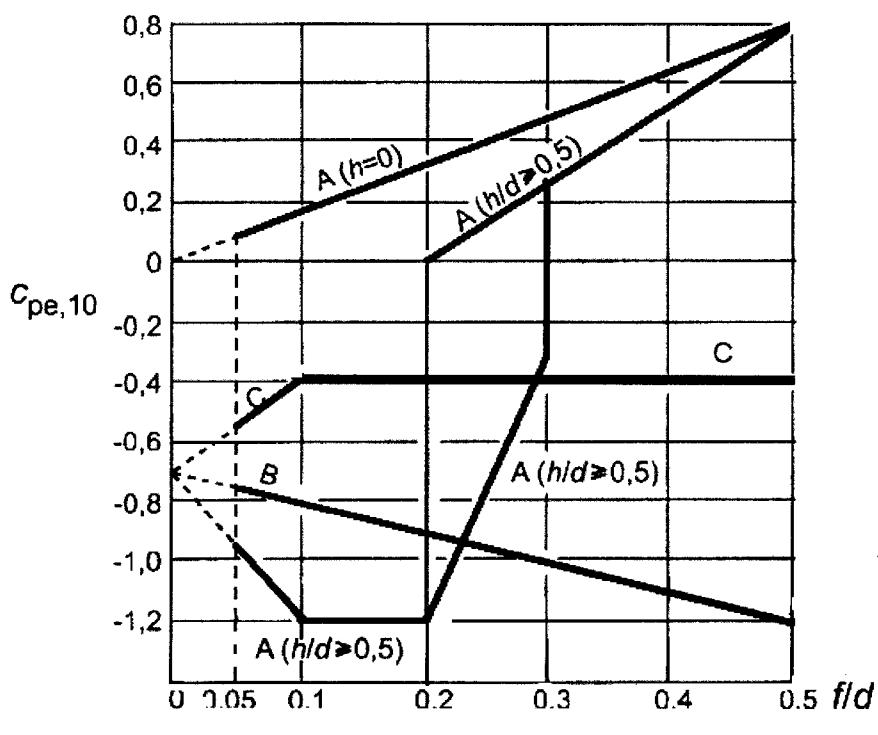


Figure 5.8 : C_{pe} pour toitures en voûtes à base rectangulaire :
(a) subdivision de la toiture ; (b) valeurs de C_{pe}

Notes pour la figure 5.8

- Pour $0 \leq h/d \leq 0,5$, C_{pe} s'obtient par interpolation linéaire.
- Pour $0,2 \leq f/d \leq 0,3$ et $h/d \geq 0,5$, deux valeurs de C_{pe} doivent être prises en compte.
- Le diagramme n'est pas applicable aux toitures terrasses.

Les coefficients de pression sur les parois verticales sont donnés au paragraphe 5.1.2.

5.1.9.2. Pour un vent parallèle aux génératrices, on adopte pour C_{pe} la valeur correspondant à une toiture à deux versants (Cf. § 5.1.5) pour $\theta = 90^\circ$ en prenant pour α (en degré) l'angle entre l'horizontale et la corde reliant la naissance de la voûte et son sommet (voir figure 5.9).

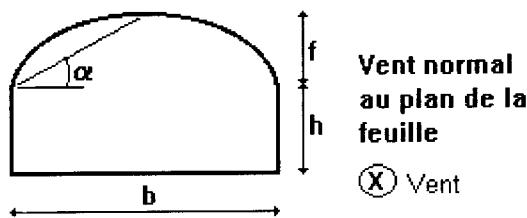


Figure 5.9 : Toiture en voûte - Vent parallèle aux génératrices

5.1.10. Avancées de toits et débords

5.1.10.1. Pour les avancées de toits (fig.5.10.a), la pression exercée sur la partie supérieure est égale à la pression de la zone définie pour la toiture elle-même. La pression exercée sur la face inférieure est égale à la pression de la zone du mur directement rattachée à l'avancée de toits.

5.1.10.2. Dans le cas de débord ne faisant pas continuité avec la toiture (fig.5.10.b), on prendra $C_p = 2,5$ pour l'auvent ou débord.

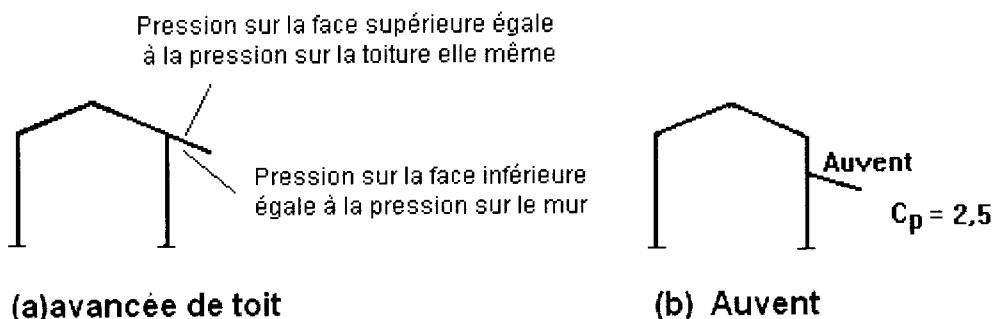


Figure 5.10 : C_p pour (a) avancée de toit (b) auvent ne faisant pas continuité avec la toiture

5.1.11. Parois verticales des constructions à base circulaire

Les coefficients C_{pe} des parois verticales des constructions à base circulaire sont donnés par :

$$\begin{cases}
 C_{p,e} = C_{p,o} & \text{pour } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\
 C_{p,e} = C_{p,o} \times \left[\psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right) \right] & \text{pour } \alpha_{\min} \leq \alpha < \alpha_A \\
 C_{p,e} = C_{p,o} \times \psi_\lambda & \text{pour } \alpha_A \leq \alpha \leq 180
 \end{cases} \quad (5.2)$$

Où:

- $C_{p,0}$ est le coefficient de pression extérieure pour un élancement infini ; $C_{p,0}$ est donné par la figure 5.12 ou le tableau 5.6 en chaque point du cylindre (défini par un angle de rotation α) en fonction du paramètre $b \times \sqrt{q_p}$
- α_A (en degrés) est la position du point de décollement de l'écoulement (voir figure 5.11),
- α_{\min} (en degrés) est la position de la pression minimale, (voir figure 5.11) ;
- ψ_λ est le facteur d'élancement (Cf. chapitre 4, § 1.2).

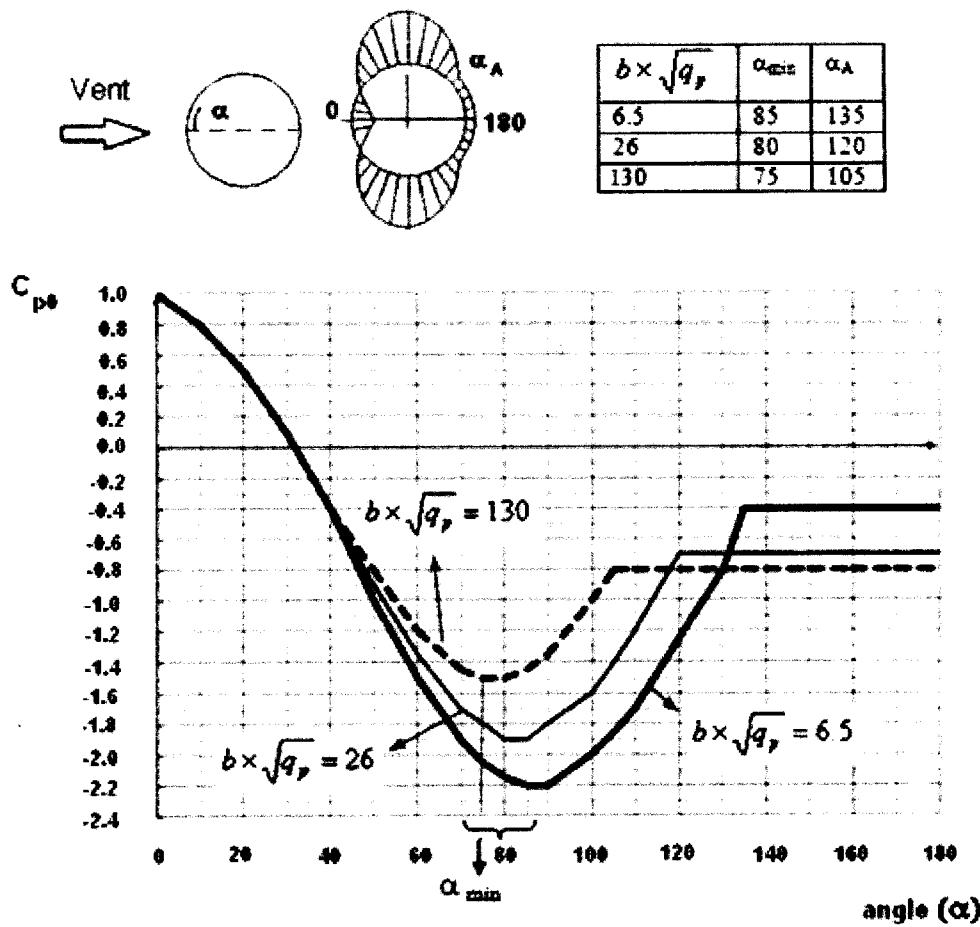


Figure 5.11 : $C_{p,0}$ pour parois verticales des constructions à bases circulaires

Angle α ($^{\circ}$)	$b \times \sqrt{q_p} = 6.5$	$b \times \sqrt{q_p} = 26$	$b \times \sqrt{q_p} = 130$
0	1	1	1
10	0.8	0.8	0.8
20	0.5	0.5	0.5
30	0.1	0.1	0.1
40	-0.4	-0.4	-0.4
50	-1	-0.9	-0.8
60	-1.5	-1.35	-1.2
70	-1.9	-1.7	-1.45
75	-2.05	-1.8	-1.5
80	-2.15	-1.9	-1.5
85	-2.2	-1.9	-1.45
90	-2.2	-1.8	-1.35
100	-2	-1.6	-1
105	-1.85	-1.4	-0.8
110	-1.7	-1.2	-0.8
120	-1.25	-0.7	-0.8
130	-0.8	-0.7	-0.8
135	-0.4	-0.7	-0.8
140	-0.4	-0.7	-0.8
150	-0.4	-0.7	-0.8
160	-0.4	-0.7	-0.8
170	-0.4	-0.7	-0.8
180	-0.4	-0.7	-0.8

Tableau 5.6 : C_{p0} pour parois verticales des constructions à bases circulaires

5.1.12. Toiture en forme de sphère ou de calotte sphérique

Il convient de diviser la toiture comme l'indique la figure 5.12. Les coefficients de pression sont donnés sur la figure 5.13.

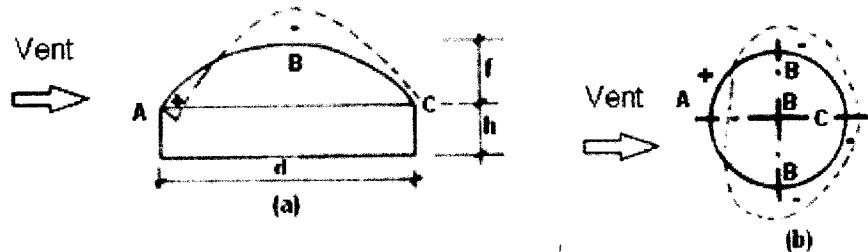


Figure 5.12 : Divisions des toitures en forme de calotte sphérique

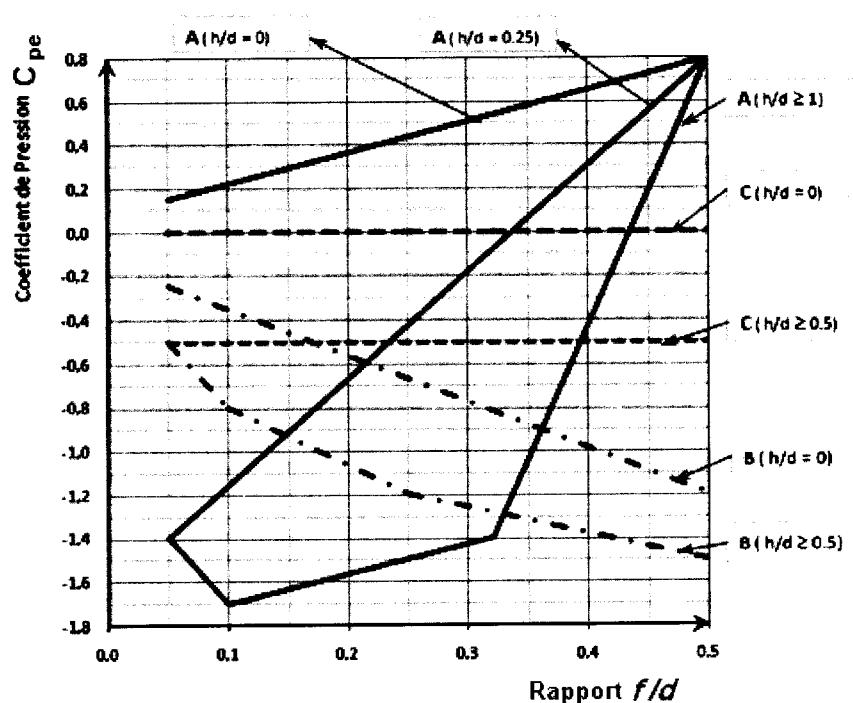


Figure 5.13 : Coefficients C_{pe} pour toitures en dômes à base circulaire

Notes pour la figure 5.13

- C_{pe} est constant sur la longueur des arcs de cercle formés par les intersections de la calotte sphérique avec les plans perpendiculaires au vent. Par exemple l'arc passant par BBB et tous les arcs parallèles à BBB ;
- Ce coefficient peut être déterminé par interpolation linéaire entre les valeurs en A, B et C le long des arcs de cercle parallèles au vent. ;
- Pour les valeurs h/d autres que celles citées sur la fig.5.13 l'interpolation linéaire est permise ;
- Les coefficients C_{pe} de la figure 5.13 sont valables quelle que soit la valeur de la surface chargée.

5.2. Coefficients de pression intérieure

5.2.1. Principes et définitions

5.2.1.1. La combinaison la plus défavorable des pressions extérieure et intérieure, considérées comme agissant simultanément, doit être envisagée simultanément pour chaque combinaison potentielle d'ouvertures et autres sources de fuite d'air.

5.2.1.2. Les valeurs des coefficients de pression intérieure C_{pi} données ci-après sont valables pour tous les types de paroi (simple ou double avec lame d'air).

Dans le cas d'une paroi verticale ou horizontale, présentant une couche d'air intermédiaire (faux-plafond, bardage par exemple), l'action du vent sur la partie extérieure ou intérieure de la paroi peut se calculer en considérant un coefficient de pression intérieure dans la couche d'air intermédiaire. Toute méthode connue qui prend en compte les pressions dans les lames d'air peut être utilisée.

5.2.1.3. Lorsque, sur au moins deux faces du bâtiment (façades ou toiture), l'aire totale des ouvertures existant sur chacune des faces représente 30 % de l'aire de cette face, il convient de calculer les actions exercées sur la construction à partir des règles définies pour les toitures isolées.

5.2.1.4. Une face d'un bâtiment est considérée comme dominante lorsque l'aire des ouvertures dans la dite face est au moins égale à deux fois l'aire des ouvertures et des fuites d'air dans les autres faces du bâtiment.

5.2.2. Valeurs de C_{pi}

5.2.2.1. Dans le cas d'un bâtiment ayant une face dominante (Cf. 5.2.1.4), le coefficient de pression intérieure est donné par:

- $C_{pi}=0.75 C_{pe}$; lorsque l'aire des ouvertures dans la face dominante est égale à deux fois l'aire des ouvertures dans les autres faces, et;
- $C_{pi}=0.90 C_{pe}$; lorsque l'aire des ouvertures dans la face dominante est au moins égale à trois fois l'aire des ouvertures dans les autres faces.

Où :

C_{pe} est la valeur du coefficient de pression extérieure au niveau des ouvertures de la face dominante. Lorsque ces ouvertures sont situées dans des zones avec des valeurs différentes de pressions extérieures, il est recommandé d'utiliser une valeur moyenne pondérée en surface de C_{pe} .

5.2.2.2. Pour les bâtiments sans face dominante, le coefficient de pression intérieure C_{pi} est déterminé à partir de la figure 5.14 avec (h) la hauteur du bâtiment, (d) sa profondeur et μ_p l'indice de perméabilité donné par :

$$\mu_p = \frac{\sum \text{des surfaces des ouvertures où } C_{pe} \leq 0}{\sum \text{des surfaces de toutes les ouvertures}}$$

Les ouvertures considérées ici sont les orifices de toute nature débouchant sur l'extérieur et au travers desquels l'air peut circuler.

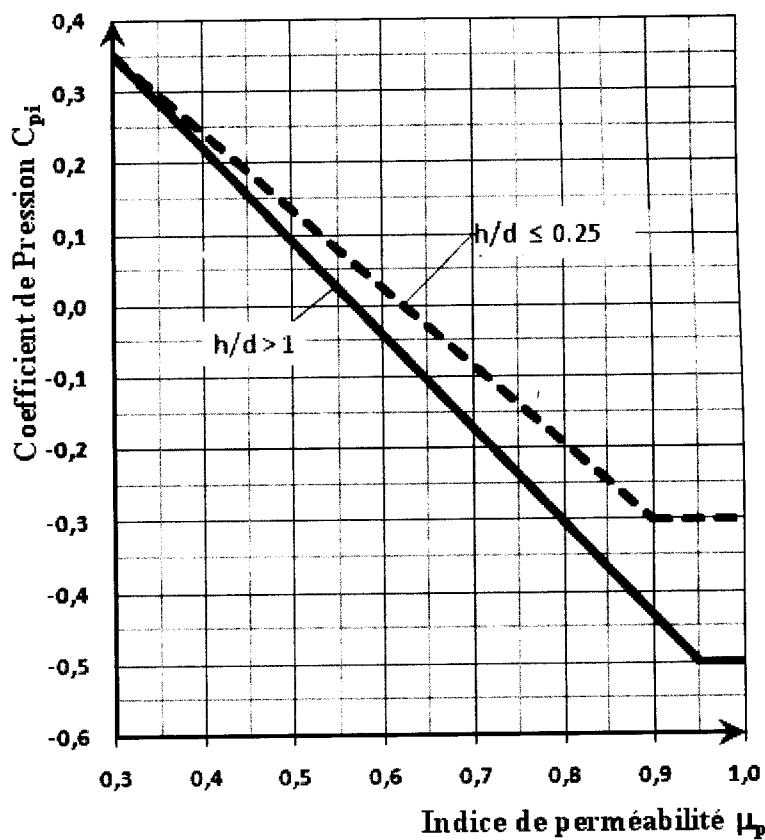


Figure 5.14 : Coefficients de pression intérieure C_{pi} des bâtiments sans face dominante

Note pour la figure 5.14

- Pour les valeurs comprises entre $h/d = 0.25$ et $h/d = 1$ une interpolation linéaire peut être utilisée.

5.2.2.3 la hauteur de référence pour les pressions intérieures est égale à la hauteur de référence z_e pour les pressions extérieures exercées sur les faces qui contribuent par leurs ouvertures à la création des pressions intérieures. Lorsqu'il existe plusieurs ouvertures la plus grande valeur de z_e est utilisée.

5.2.2.4 Le coefficient de pression intérieure des silos ouverts et des cheminées est égal à $C_{pi}=0.60$.

5.2.2.5. Le coefficient de pression intérieure des réservoirs ventilés par ouvertures de petites dimensions est égal à $C_{pi}=0.40$.

5.3. Coefficients pour les toitures isolées

5.3.1. Principes et définitions

5.3.1.1. Les toitures isolées sont des toitures de constructions ne comportant pas de murs permanents, telles que celles des stations-service, hangars ouverts, etc.

5.3.1.2. Les coefficients de force globaux et les coefficients de pression nette C_{pnet} tiennent compte de l'effet combiné du vent agissant sur la surface inférieure et supérieure de la toiture. Ils sont indépendants de la valeur de la surface chargée.

5.3.1.3. Deux types de coefficients sont donnés pour les toitures isolées :

- un coefficient de force global associé à la résultante des forces ; ce coefficient doit être utilisé pour le calcul d'ensemble et pour le dimensionnement de la toiture ;
- un coefficient de pression local $C_{p,net}$ qui tient compte de l'effet combiné du vent agissant sur la surface inférieure et supérieure de la toiture associé à la force locale maximale ; ce coefficient doit être utilisé pour la vérification des éléments secondaires de la toiture isolée et des fixations.

5.3.1.4. Le centre de pression de la force résultante doit être pris égal :

- pour les toitures isolées à un versant (voir figure 5.15) : à la distance $d/4$ de la rive au vent, d étant la dimension de la toiture parallèle au vent ;
- pour les toitures isolées à deux versants (voir figure 5.16) et à redans : au centre de chaque versant. De plus, une toiture isolée à deux versants ou à redans doit être capable de résister à un chargement maximal ou minimal sur un de ses versants, l'autre versant ne recevant pas de charge (voir figure 5.16).

5.3.1.5 les coefficients de force et de pression des toitures multiples isolées, sont obtenus en appliquant les facteurs de réduction donnés par le tableau 5.7 aux valeurs des coefficients de force négatifs et aux coefficients de pressions $C_{p,net}$ négatifs (forces et pressions ascendantes) correspondant aux toitures isolées à deux versants données par le tableau 5.9.

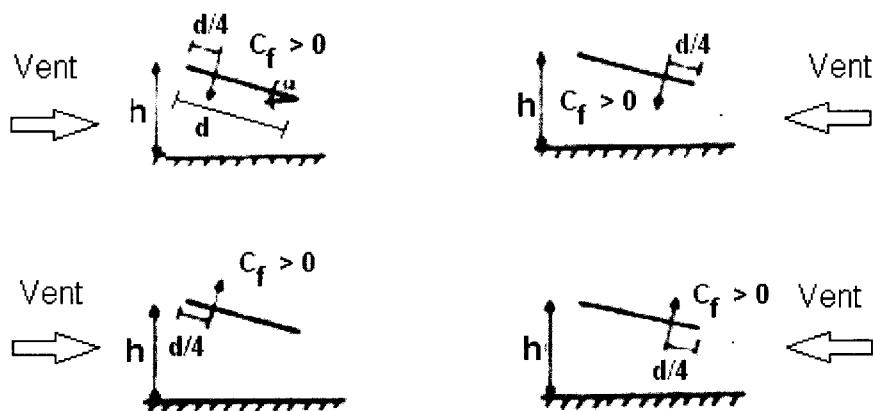


Figure 5.15 : Centre de force pour les toitures isolées à un versant

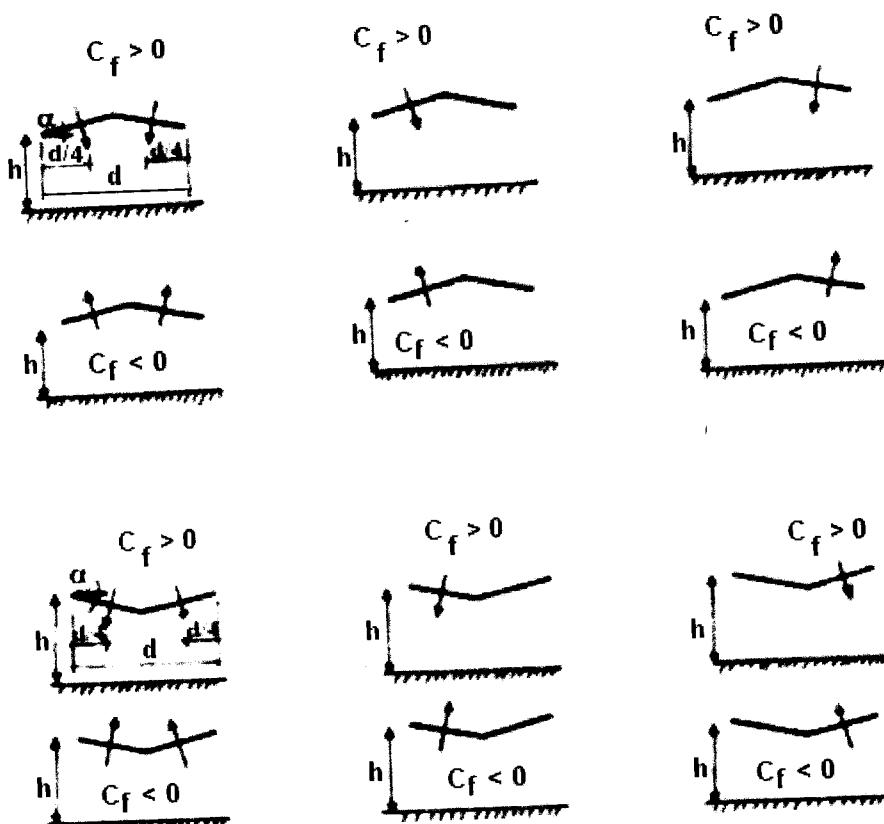


Figure 5.16 : Centre de force pour les toitures isolées à deux versants quel que soit la direction du vent

Travée (voir figure 5.17)	Emplacement	Coefficients correcteurs	
		Sur le coefficient global maximal (vers le bas)	Sur le coefficient global minimal (vers le haut)
1	travée d'extrémité	1,00	0,8
2	deuxième travée	0,9	0,7
3	troisième travée et suivantes	0,7	0,7

Tableau 5.7 : Coefficients correcteurs pour les toitures multiples isolées

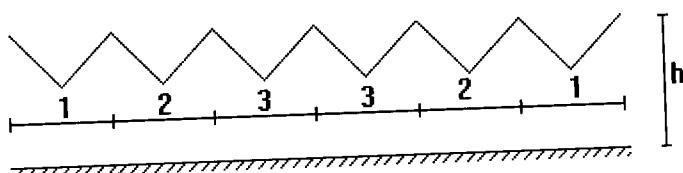


Figure 5.17 : Désignation des travées pour toitures multiples isolées

5.3.2. Valeurs des coefficients de pression

5.3.2.1. Pour toutes les directions du vent, les valeurs des coefficients de force globaux et les coefficients de pressions locaux $C_{p,nette}$ sont données dans les tableaux 5.8 pour toitures à un versant et 5.9 C_p pour toitures isolées à deux versants. Des valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

Angle de la toiture α (degrés)	Obstruction $\varphi^{(*)}$	Coefficients de force globaux C_f	Coefficients de pression locaux $C_{p,nette}$		
			zone t	zone r	zone u
0	Surpression φ quelconque	+0,2	+0,5	+1,8	+1,1
	dépression $\varphi=0$	-0,5	-0,6	-1,3	-1,4
		-1,3	-1,5	-1,8	-2,2
5	Surpression φ quelconque	+0,4	+0,8	+2,1	+1,3
	dépression $\varphi=0$	-0,7	-1,1	-1,7	-1,8
		-1,4	-1,6	-2,2	-2,5
10	Surpression φ quelconque	+0,5	+1,2	+2,4	+1,6
	dépression $\varphi=0$	-0,9	-1,5	-2,0	-2,1
		-1,4	-2,1	-2,6	-2,7
15	Surpression φ quelconque	+0,7	-1,4	+2,7	+1,8
	dépression $\varphi=0$	-1,1	-1,8	-2,4	-2,5
		-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
20	Surpression φ quelconque	+0,8	+1,7	+2,9	+2,1
	dépression $\varphi=0$	-1,3	-2,2	-2,8	-2,9
		-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
25	Surpression φ quelconque	+1,0	+2,0	+3,1	+2,3
	dépression $\varphi=0$	-1,6	-2,6	-3,2	-3,2
		-1,4	-1,5	-2,5	-2,8
30	Surpression φ quelconque	+1,2	+2,2	+3,2	+2,4
	dépression $\varphi=0$	-1,8	-3,0	-3,8	-3,6
		-1,4	-1,5	-2,2	-2,7

() L'obstruction est le rapport de l'aire des obstacles sous la toiture divisée par l'aire de la section transversale sous la voûte. Les deux aires étant mesurées perpendiculairement à la direction du vent*

Tableau 5.8 : Valeurs de C_p pour toitures à un versant

Angle de la toiture α (degrés)	Obstruction $\varphi^{(*)}$	Coefficients de force globale C_f	Coefficients de pression locaux $C_{p,\text{nette}}$			
			zone t	zone r	zone u	zone s
-20	Surpression φ quelconque	+0.7	+0.8	+1.6	+0.6	+1.7
	dépression $\varphi=0$	-0.7	-0.9	-1.3	-1.6	-0.6
		-1.3	-1.5	-2.4	-2.4	-0.6
-15	Surpression φ quelconque	+0.5	+0.6	+1.5	+0.7	+1.4
	dépression $\varphi=0$	-0.6	-0.8	-1.3	-1.6	-0.6
		-1.4	-1.6	-2.7	-2.6	-0.6
-10	Surpression φ quelconque	+0.4	+0.6	+1.4	+0.8	+1.1
	dépression $\varphi=0$	-0.6	-0.8	-1.3	-1.5	-0.6
		-1.4	-1.6	-2.7	-2.6	-0.6
-5	Surpression φ quelconque	+0.3	+1.5	+1.5	+0.8	+0.8
	dépression $\varphi=0$	-0.5	-0.7	-1.3	-1.6	-0.6
		-1.3	-1.5	-2.4	-2.4	-0.6
+5	Surpression φ quelconque	+0.3	+0.6	+1.8	+1.3	+0.4
	dépression $\varphi=0$	-0.6	-0.6	-1.4	-1.4	-1.1
		-1.3	-1.3	-2.0	-1.8	-1.5
+10	Surpression φ quelconque	+0.4	+0.7	+1.8	+1.4	+0.4
	dépression $\varphi=0$	-0.7	-0.7	-1.5	-1.4	-1.4
		-1.3	-1.3	-2.0	-1.8	-1.8
+15	Surpression φ quelconque	+0.4	+0.9	+1.9	+1.4	+0.4
	dépression $\varphi=0$	-0.8	-0.9	-1.7	-1.4	-1.8
		-1.3	-1.3	-2.2	-1.6	-2.1
+20	Surpression φ quelconque	+0.6	+1.1	+1.9	+1.5	+0.4
	dépression $\varphi=0$	-0.9	-1.2	-1.8	-1.4	-2.0
		-1.3	-1.4	-2.2	-1.6	-2.1
+25	Surpression φ quelconque	+0.7	+1.2	+1.9	+1.6	+0.5
	dépression $\varphi=0$	-1.0	-1.4	-1.9	-1.4	-2.0
		-1.3	-1.4	-2.0	-1.5	-2.0
+30	Surpression φ quelconque	+0.9	+1.3	+1.9	+1.6	+0.7
	dépression $\varphi=0$	-1.0	-1.4	-1.9	-1.4	-2.0
		-1.3	-1.4	-1.8	-1.4	-2.0

() L'obstruction est le rapport de l'aire des obstacles sous la toiture divisée par l'aire de la section transversale sous la voûte. Les deux aires étant mesurées perpendiculairement à la direction du vent*

Tableau 5.9 : Valeurs de C_p pour toitures isolées à deux versants

Note pour les tableaux 5.8 et 5.9

- Dans les zones de chevauchement, les coefficients de pression locaux les plus défavorables sont à utiliser.

5.3.2.2. Il convient de prendre en considération l'action des forces de frottement selon la méthode décrite au chapitre 2, paragraphe 2.6.3.

Les toitures isolées en forme de voûte peuvent être assimilées à des toitures isolées à versants plans. On remplace dans ce cas chaque voûte par le versant formé par une corde reliant la clef de la voûte à sa naissance.

5.4. Éléments en relief et discontinuités

Les coefficients de pression donnés dans ce paragraphe sont des coefficients de pression nette. Ces coefficients de pression ne doivent en aucun cas être utilisés pour le calcul des actions d'ensemble (dimensionnement de la structure porteuse). Ils doivent être seulement considérés pour déterminer l'action du vent sur les éléments secondaires.

5.4.1. Éléments en relief

Les valeurs des coefficients de pression nette à considérer pour les éléments tels que parapets, acrotères, balcons, auvents, éléments verticaux en relief sont données dans la figure 5.18.

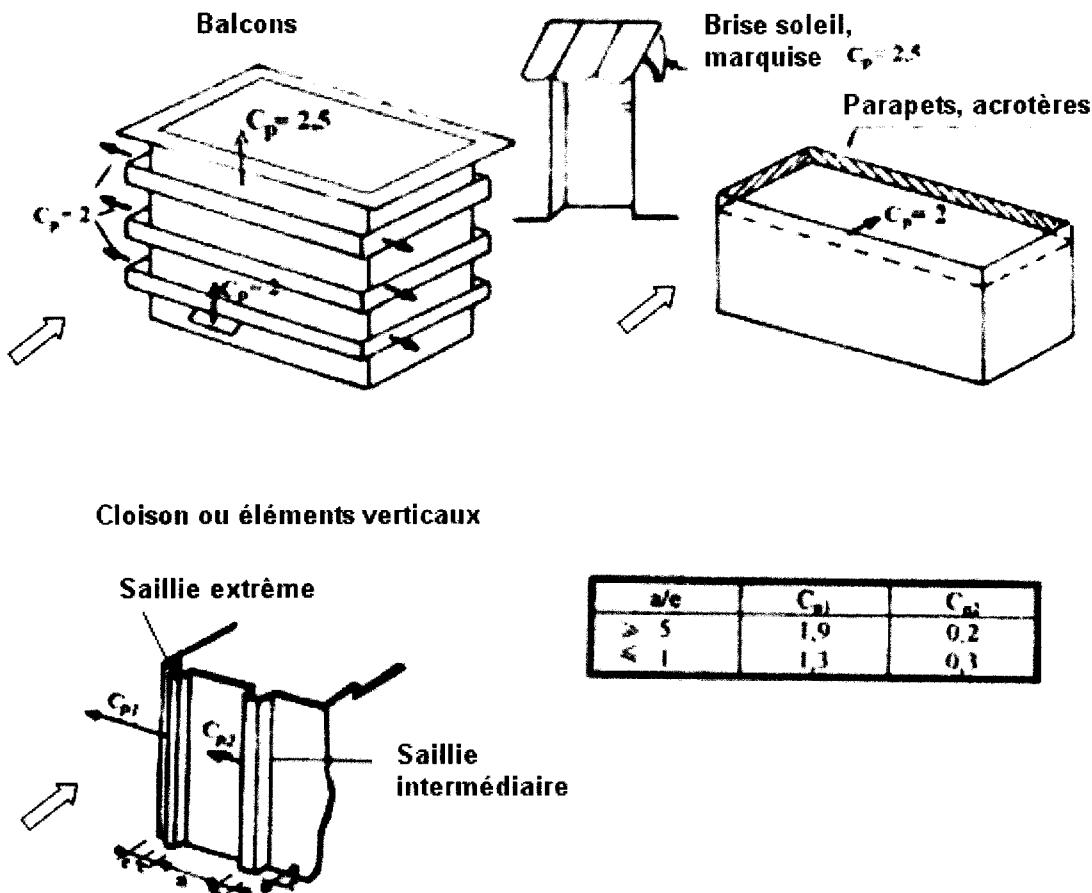
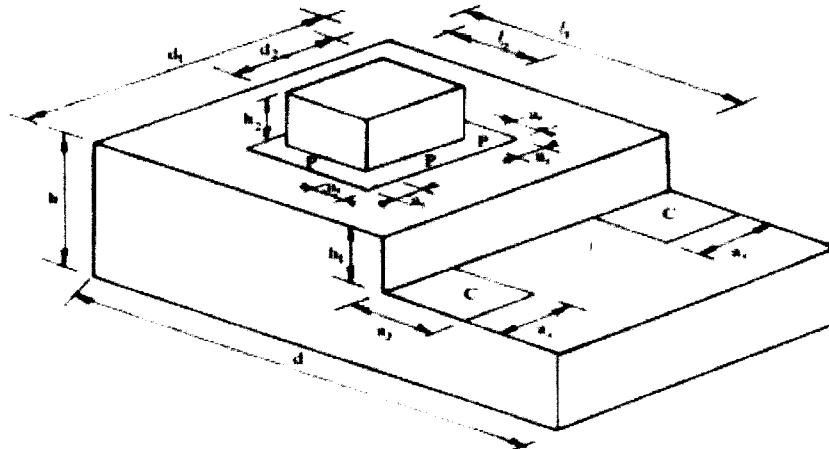


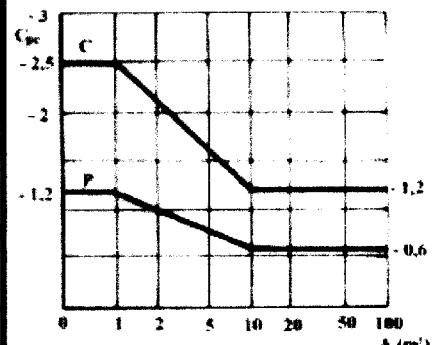
Figure 5.18 : Coefficients de pression nette des éléments en relief

5.4.2. Toitures avec discontinuités

Les valeurs des coefficients de pression extérieure au bas des discontinuités sont données dans la figure 5.19.



$a_3 = \text{valeur ci-contre la plus grande}$	$h_1 \leq \ell_1$	$h_1 > \ell_1$
	h_1 1m	ℓ_1 1m
$a_4 = \text{valeur ci-contre la plus grande}$	$h_2 \leq 0,25 d_1$	$h_2 > 0,25 d_1$
	h_2 1m	$0,25 d_1$ 1m
$a_5 = \text{valeur ci-contre la plus grande}$	$h_2 \leq 0,5 \sqrt{\ell_2^2 + d_2^2}$	$h_2 > 0,5 \sqrt{\ell_2^2 + d_2^2}$
	h_2 1m	$0,5 \sqrt{\ell_2^2 + d_2^2}$ 1m



A : surface en
 m^2 de la zone
 P ou C

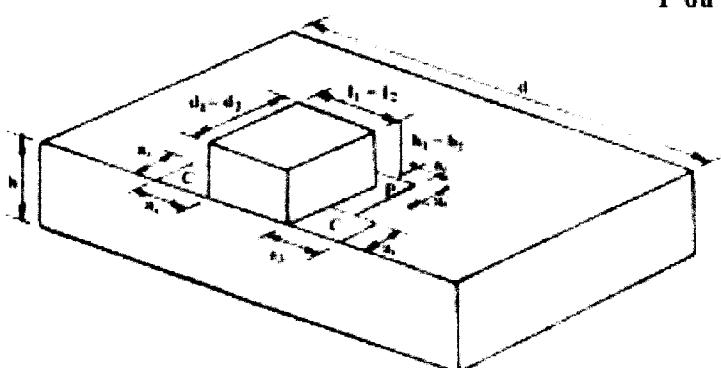


Figure 5.19 : $C_{p,nette}$ au bas des discontinuités pour des toitures terrasses

5.5. Cas des murs isolés, et panneaux de signalisation

5.5.1. Les paramètres L , h , z_g sont définis dans la figure 5.20.

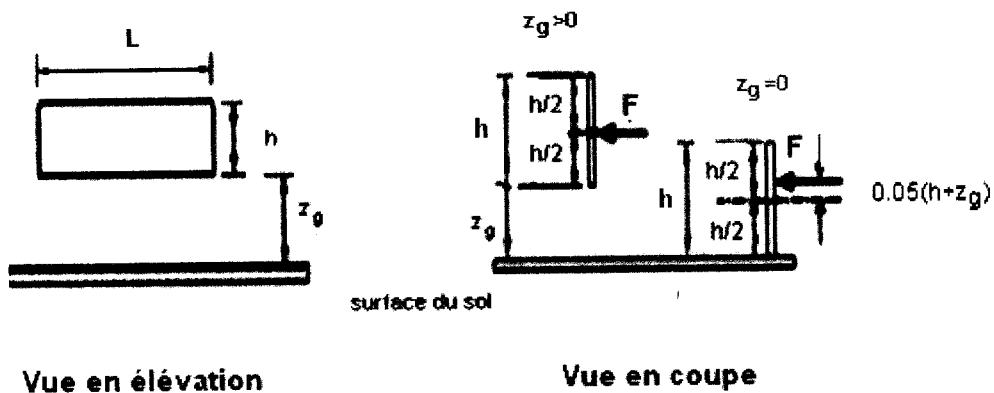


Figure 5.20 : Légende appliquée aux murs isolés et panneaux de signalisations

5.5.2. Pour tenir compte des directions du vent, les cas de force suivants (fig 5.21) sont considérés:

- **Pour $z_g > 0$**

- **Cas A** : la résultante des forces agit perpendiculairement au mur en passant par son centre de gravité ;
- **Cas B** : la résultante des forces agit perpendiculairement au mur avec une excentricité horizontale du côté au vent $e = 0.2.L$;
- **Cas C** (pour $L/h > 2$) : Identique au cas A pour chaque tronçon de longueur h .

- **Pour $z_g = 0$,**

- Les mêmes cas ci-dessus, où la résultante des forces est appliquée avec une excentricité verticale de $0.05h$ au-dessus du c.d.g.

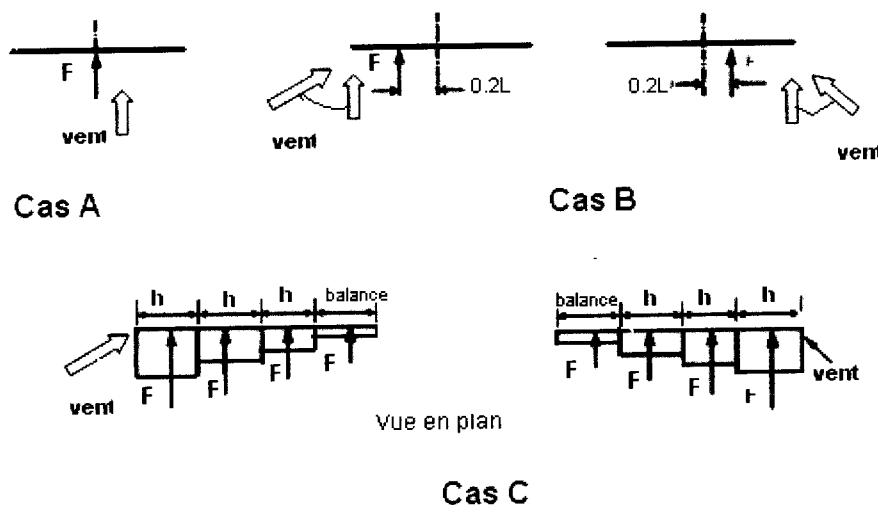


Figure 5.21 : Cas de charges appliquées aux murs isolés et panneaux de signalisations

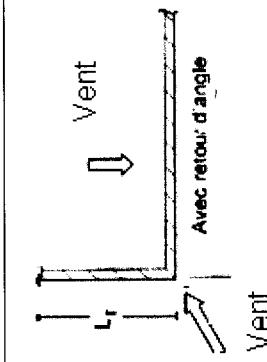
5.5.3. Les coefficients de pression C_{pnet} sont donnés par le tableau 5.10 pour le cas A et B et le tableau 5.11 pour le cas C.

		C _{pnet} cas A et cas B											
		Rapport L / h											
$\frac{z_g}{z_g + h}$		0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	4	5	10	20	30	45
		0	1.80	1.70	1.65	1.55	1.45	1.40	1.35	1.35	1.30	1.30	1.30
0.1	1.85	1.75	1.70	1.60	1.55	1.50	1.45	1.45	1.40	1.4	1.40	1.40	1.40
0.3	1.90	1.85	1.75	1.70	1.65	1.60	1.60	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
0.5	1.95	1.85	1.80	1.75	1.75	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.75
0.7	1.95	1.90	1.85	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.85	1.85	1.85
0.8	1.95	1.90	1.85	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.85	1.90	1.90	1.95	1.95
0.84	1.95	1.90	1.85	1.85	1.80	1.80	1.85	1.85	1.85	1.90	1.90	1.95	1.95

Tableau 5.10 : coefficient de pression C_{pnet} pour les murs isolés et panneaux de signalisation (cas a et B)

		C_{pnet} cas C										
		Rapport L/h										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	> 45
0 à h	2.25	2.60	2.90	3.10	3.30	3.40	3.55	3.65	3.75	4.00	4.30	
h à 2h	1.50	1.70	1.90	2.00	2.15	2.25	2.30	2.35	2.45	2.60	2.55	
2h à 3h		1.15	1.30	1.45	1.55	1.65	1.70	1.75	1.85	2.00	1.95	
3h à 4h			1.10	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
4h à 5h				1.10	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
5h à 10h					1.10	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.10	
> 10h										0.95	0.55	
											0.55	

	L_r/h	Facteurs de réduction	
		0.3	0.90
Ces valeurs doivent être multipliées par les facteurs de réduction suivants dans le cas où un retour d'angle de longueur L_r existe	1	0.75	
	≥2	0.60	

Tableau 5.11 : coefficient de pression C_{pnet} pour les murs isolés et panneaux de signalisation (cas C)

Notes pour les tableaux 5.10 et 5.11

- les coefficients de force des panneaux avec ouverture sont multipliés par un coefficient de réduction égale à $(1-(1-\phi)^{1.5})$, ϕ étant le rapport de la surface pleine à la surface brute ;
- dans le cas C, et pour des rapports $z_g=0$, les coefficients de force sont multipliés par un coefficient de réduction égale à $1.8 - z_g/(z_g+h)$;
- l'interpolation linéaire est permise pour des valeurs intermédiaires de $z_g/(z_g+h)$, L/h , et L_r/h .

ANNEXE 1 :**ZONES DE VENT**

Pour l'obtention des zones de vent, on a recours à la notion de vitesse de référence du vent. Celle-ci est définie de la manière suivante :

La vitesse de référence du vent, $V_{\text{réf}}$, est la vitesse moyenne sur dix minutes mesurée dans les conditions conventionnelles avec une probabilité annuelle de dépassement égale à 0,02 (ce qui correspond à une période de retour de 50 ans).

Quatre (04) zones de vent ont été définies (zones I, II III et IV). Les valeurs de la vitesse de référence correspondantes à chaque zone sont présentées dans le tableau A1.

Zone	$V_{\text{réf}}$ (m/s)
I	25
II	27
III	29
IV	31

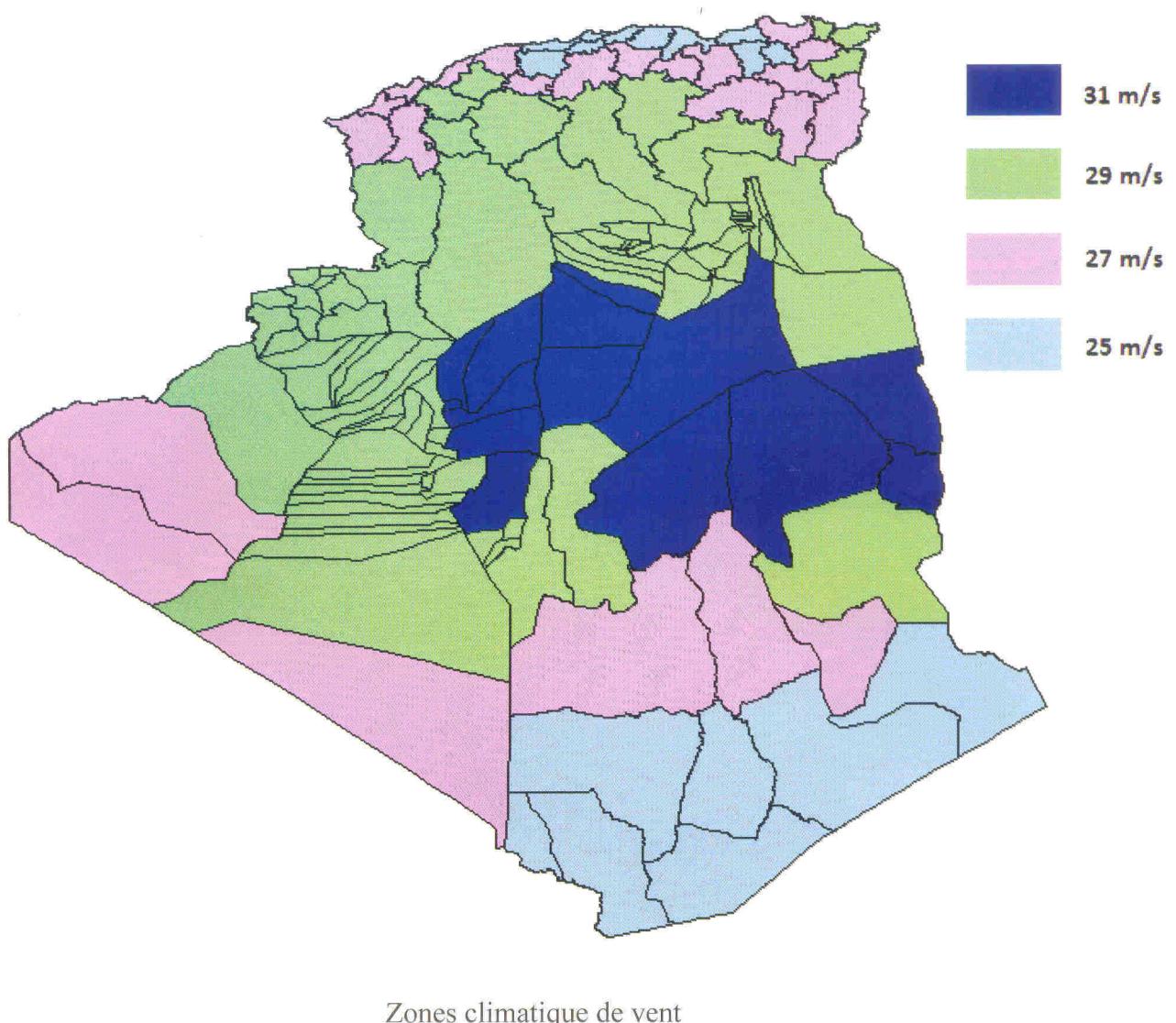
Tableau A1 : Valeurs de la vitesse de référence du vent

Le tableau A2 donne la classification des zones climatiques du vent des wilayas et communes du territoire national

CODE	WILAYA	Zone de vent
01	ADRAR	I
	Commune de TIMIAOUINE	
	Commune de BORDJ BADJI MOKHTAR	II
	Toutes les autres communes	III
02	CHLEF	II
03	LAGHOUAT	III
04	OUM EL BOUAGHI	II
05	BATNA	II
06	BEJAIA	I
07	BISKRA	III
08	BECHAR	III
	Toutes les communes à l'exception de la commune de TEBALBALA	
	Commune de TABELBALA	II
09	BLIDA	I
10	BOUIRA	II
11	TAMANGHASSET	IV
	Commune de : FOUGGARAT EZ ZOUAIA	
	Commune de: IN SALAH, IN GHAR,	III
	Commune de : IDLES, IN AMGAL	II
	Toutes les autres communes	I
12	TEBESSA	II
13	TLEMCEN	II
14	TIARET	III
15	TIZI OUZOU	I
16	ALGER	I
17	DJELFA	III
18	JIJEL	I
19	SETIF	II
20	SAIDA	III
21	SKIKDA	II
22	SIDI BEL ABBES	II
23	ANNABA	III
24	GUELMA	II

25	CONSTANTINE	I
26	MEDEA	II
27	MOSTAGANEM	II
28	M'SILA	III
29	MASCARA	III
30	OUARGLA : Commune de : HASSI MESSAOUD	IV
	Toutes les autres communes	III
31	ORAN	II
32	EL BAYADH	III
33	ILLIZI Commune de Djanet	I
	Commune de : Illizi	III
	Commune de Bordj EL Houadj	II
	Toutes les autres communes	IV
34	BORDJ BOU ARRERIDJ	II
35	BOUMERDES	I
36	EL TARF	III
37	TINDOUF Communes de :TINDOUF, ELASSEL	II
	Toutes les autres communes	III
38	TISSEMSILT	II
39	EL OUED	III
40	KHENCHELA	II
41	SOUK AHRAS	III
42	TIPAZA	I
43	MILA	I
44	AIN DEFLA	I
45	NAAMA	III
46	AIN TEMOUCHENT	II
47	GHARDAIA Communes de : HASSIEL GARAA, GOLEA, HASSI LEFHAL	IV
	Toutes les autres communes	III
48	RELIZANE	III

Tableau A.2 : Zones climatiques du vent



ANNEXE 2 : Vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent est la vitesse moyenne sur dix minutes pour des conditions non conventionnelles. La vitesse moyenne du vent $V_m(z)$ est donnée par :

$$V_m(z) = C_r(z) \times C_t(z) \times V_{réf} \quad [m/s] \quad (A2.1)$$

Où :

- $C_r(z)$ est le coefficient de rugosité (*Cf. chapitre 2, § 2.4.4*) ;
- $C_t(z)$ est le coefficient de topographie (*Cf. chapitre 2, § 2.4.5*) ;
- $V_{réf}$ (en m/s) est la vitesse de référence (*Cf. annexe 1*).

ANNEXE 3 : EXCITATION PAR LE DETACHEMENT TOURBILLONNAIRE

1. Généralités

Les constructions «élancées» nécessitent la prise en compte des phénomènes dynamiques suivants :

- détachement tourbillonnaire ;
- phénomène de galop classique ;
- effets d'interaction entre le détachement tourbillonnaire et le phénomène de galop ;
- effets d'interférence (qui se produisent par exemple dans le cas où plusieurs constructions ou éléments verticaux identiques sont disposés en file) ;
- phénomènes de divergence et de flottement qui sont des manifestations d'instabilité qui ne peuvent se produire que sur des constructions souples de type plaque telles que les tabliers de ponts suspendus.

Le phénomène le mieux connu et pour lequel il existe des méthodes de calcul est celui des excitations par le détachement tourbillonnaire (dit de Von Karman). Cette annexe fournit à titre indicatif une méthode de calcul vis à vis de ce phénomène. Cette méthode ne concerne que les constructions encastrées en pied (consoles).

Pour les autres phénomènes, il est recommandé d'effectuer des essais en soufflerie (Cf. annexe 5) ou de rechercher l'avis de spécialistes.

2. Description du phénomène physique

Dans un écoulement d'air autour d'une construction, de petits tourbillons dus à la viscosité de l'air se créent à sa surface et commencent à grandir en se déplaçant vers l'aval. Ces tourbillons décollent de la surface alternativement de chaque côté de la construction et exercent sur les surfaces latérales une pression alternée. Cette pression peut être suffisante pour produire des oscillations en flexion non négligeables si la fréquence des tourbillons est proche d'une fréquence propre de la construction (phénomène de résonance). La résonance due au détachement tourbillonnaire se produit pour une vitesse critique notée V_{crit} .

En toute rigueur, s'il y a résonance due au détachement tourbillonnaire pour le mode fondamental, il y a lieu de vérifier le risque suivant le deuxième mode, et ainsi de suite. On admet en fait que les oscillations pour les modes supérieurs sont suffisamment amorties pour ne pas être perceptibles. C'est pourquoi, seul le risque de détachement tourbillonnaire pour le mode fondamental est vérifié.

3. Critères de sensibilité au détachement tourbillonnaire

Il convient de faire les vérifications du détachement tourbillonnaire dans les situations suivantes :

- Le rapport d'élancement de la construction (Le rapport d'élancement est le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension) est supérieur à 6 ;
- La vitesse critique est telle que :

$$V_{crit} > 1.25 \times V_{m,L} \quad [m/s] \quad (A3.1)$$

Où :

- V_{crit} (en m/s) est la vitesse critique (formule A3.2),
- $V_{m,L}$ (en m/s) est la vitesse moyenne du vent (Cf. annexe 2, formule A2.1) calculée à la hauteur z égale à $(5h)/6$, où h (en m) désigne la hauteur de la construction.

Pour les constructions en console, on admet que l'action due au détachement tourbillonnaire est maximale au niveau du tiers supérieur de la construction, appelé longueur de corrélation effective. La hauteur $(5h)/6$ correspond en fait au centre de la longueur de corrélation effective.

4. Vitesse critique

La vitesse critique du vent V_{crit} (pour le mode fondamental) se calcule comme suit :

$$V_{crit} = \frac{b \times n_{1,y}}{S_t} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{A3.2})$$

Où :

- b (en m) est la largeur de la section transversale au droit de la longueur de corrélation effective (c'est à dire à $z = 5h/6$) ; pour les sections circulaires, (b) représente le diamètre extérieur ;
- $n_{1,y}$ (en Hz) est la fréquence propre de vibration du mode fondamental dans la direction perpendiculaire à celle du vent ; des formules sont données au § 3.3.4.
- S_t nombre de Strouhal donné dans tableau A3.1

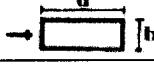
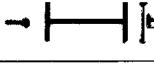
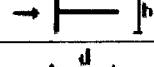
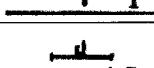
Section transversale	Conditions	S_t	$C_{lat,0}$
	Pour tous les nombres de Reynolds	0,2	(voir fig. A3.4)
	$0,5 \leq d/b \leq 10$	(voir fig. A3.2)	1,1
	$d/b = 1$ $d/b = 1,5$ $d/b = 2$	0,11 0,10 0,14	0,8 1,2 0,3
	$d/b = 1$ $d/b = 2$	0,13 0,08	1,6 2,3
	$d/b = 1$ $d/b = 2$	0,16 0,12	1,4 1,1
	$d/b = 1,3$ $d/b = 2,0$	0,11 0,07	0,8 1,0

Tableau A3.1 : Nombres de Strouhal et coefficients d'excitation aérodynamique $C_{lat,0}$

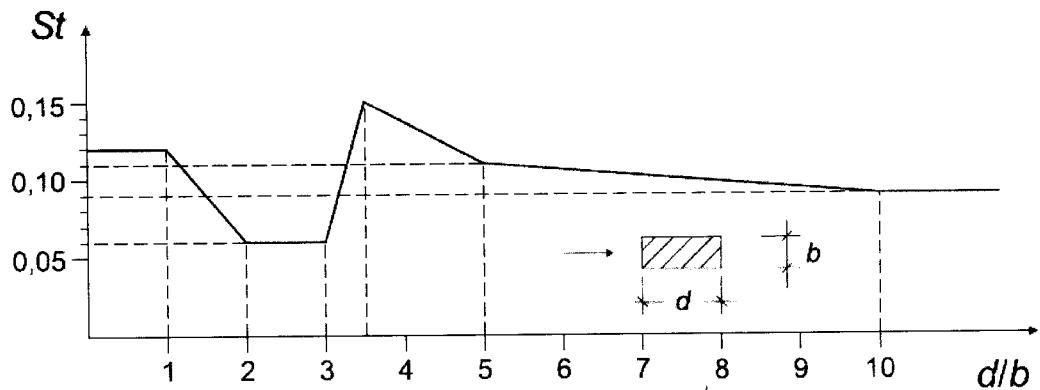


Figure A3.1 : Nombre de Strouhal pour les sections rectangulaires

5. Action due au détachement tourbillonnaire

La force d'inertie F_{y_j} exercée perpendiculairement à la direction du vent au point j de la construction est donnée par :

$$F_{y_j} = m_j \times (2 \times \pi \times n_{1,y})^2 \times \phi_{1(j)} \times \max y_F \quad (\text{A3.3})$$

Où :

- m_j (en kg) est la masse totale (en vibration) au point j ;
- $n_{1,y}$ (en Hz) est la fréquence fondamentale de vibration dans la direction perpendiculaire à celle du vent ; des valeurs approchées sont données en 3.3.4 ;
- $\phi_{1(j)}$ est la déformée pour le mode fondamental de vibration dans la direction perpendiculaire à celle du vent (Cf. § 6.3.3) ;
- $\max y_F$ (en m) est l'amplitude maximale de déplacement du ventre considéré pour le mode fondamental. L'amplitude maximale $\max y_F$ pour la vitesse critique se calcule comme suit :

$$\frac{\max y_F}{b} = K_w \times K \times C_{lat} \times \frac{1}{S_t} \times \frac{1}{S_c} \quad (\text{A3.4})$$

Où :

- b (en m) est la largeur de la section transversale au droit de la longueur de corrélation effective (c'est à dire à $z = 5h/6$) ; pour les sections circulaires, d_L est le diamètre extérieur ;
- K_w est le coefficient de longueur de corrélation effective (Cf. § 6.1) ;
- K est le coefficient de déformée modale (Cf. § 6.1) ; K est le coefficient d'excitation aérodynamique (Cf. § 6.2) ;
- C_{lat} est le coefficient d'excitation aérodynamique (Cf. § 6.2) ;

- S_t est le nombre de Strouhal (Cf. § 4.2) ;
- S_c est le nombre de Scruton (Cf. § 6.3).

A l'action transversale F_y (suivant y), il faut ajouter vectoriellement l'action du vent F_w incident (suivant x) calculée pour une vitesse égale à la vitesse critique V_{crit} (voir figure A3.2).

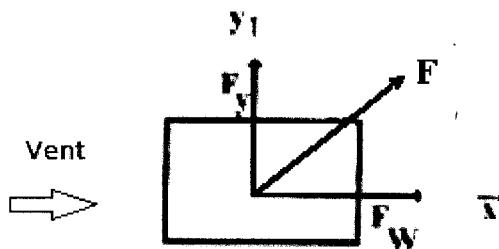


Figure A3.2 : Composition vectorielle des effets du vent

6. Paramètres pour le calcul des actions dues au détachement tourbillonnaire

6.1. Coefficients de longueur de corrélation effective et de déformée modale

Les coefficients K et K_w sont donnés dans le tableau A3.2.

Type de construction	K_w	K
Bâtiments à noyau central et poteaux périphériques,	0.5	0.12
Bâtiments à structure poteaux/poutres		
Bâtiments à noyau central et voiles périphériques	0.63	0.125
Tours et cheminées	0.70	0.13
Structures en treillis	0.70	0.14

Tableau A3.2 : Valeurs de K et K_w

6.2. Coefficient d'excitation aérodynamique

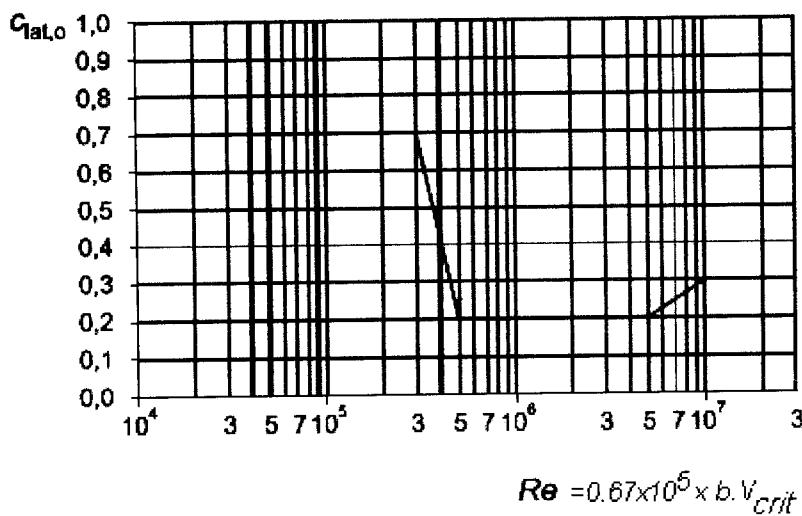
6.2.1. Le coefficient d'excitation aérodynamique C_{lat} est donné par le tableau A3.3 en fonction de :

- $C_{lat,0}$ valeur de base de C_{lat} (voir tableau A3.1) pour les sections autres que circulaires, ou figure A3.4 pour les sections circulaires) ;
- V_{crit} (en m/s) est la vitesse critique du vent (Cf. § 4.2) ;
- $V_{m,L}$ (en m/s) est la vitesse moyenne du vent (Cf. annexe 2, formule A2.1) calculée à la hauteur z égale à $(5 h)/6$, où h (en m) désigne la hauteur totale de la construction.

Rapport des vitesses critiques de vent	C_{lat}
$\frac{V_{crit}}{V_{m,L}} \leq 0.83$	$C_{lat} = C_{lat,0}$
$0.83 \leq \frac{V_{crit}}{V_{m,L}} \leq 1.25$	$C_{lat} = (3 - 2.4 \times \frac{V_{crit}}{V_{m,L}}) \times C_{lat,0}$
$\frac{V_{crit}}{V_{m,L}} > 1.25$	0

Tableau A3.3 : Valeurs de C_{lat}

6.2.2. La valeur de $C_{lat,0}$ pour les sections circulaires est donnée dans la figure A3.3 en fonction du nombre de Reynolds ($Re = 0.67 \times 10^5 \times b \cdot V_{crit}$)

Figure A3.3 : Valeur de base $C_{lat,0}$ pour les sections circulaires

6.3. Nombre de Scruton

6.3.1. Le nombre de Scruton S_c s'obtient comme suit :

$$S_c = \frac{2 \times m_l \times \delta_s}{\rho \times b^2} \quad (\text{A3.5})$$

- ρ (en kg/m^3) est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$) ;
- m_l (en kg/m) est la masse équivalente par unité de longueur de la structure (Cf. § 6.3.2) ;
- δ_s est le décrément logarithmique d'amortissement structural (Cf. chapitre 3, tableau 3.1) ;
- b (en m) est la largeur de la section transversale au droit de la longueur de corrélation effective (c'est à dire à $z = 5h/6$) ; pour les sections circulaires, b représente le diamètre extérieur.

6.3.2. La masse équivalente m_1 par unité de longueur est définie comme suit :

$$m_1 = \frac{\int_0^h m \cdot \phi_1^2(z) dz}{\int_0^h \phi_1^2(z) dz} \quad [\text{kg/m}] \quad (\text{A3.6})$$

- m (en kg/m) est la masse par unité de longueur ;
- h (en m) est la hauteur totale de la construction ;
- ϕ_1 est la déformée pour le mode fondamental.

Pour les structures verticales en console présentant une répartition de masse variable, m_1 peut être assimilée à la valeur moyenne de m calculée sur le tiers supérieur de la construction

Pour les structures appuyées aux eux extrémités de la portée présentant une répartition de masse variable, m_1 peut être assimilée à la valeur moyenne de m calculée sur le tiers de la longueur de la portée centrée sur le point de la construction où la valeur de ϕ_1 est maximale.

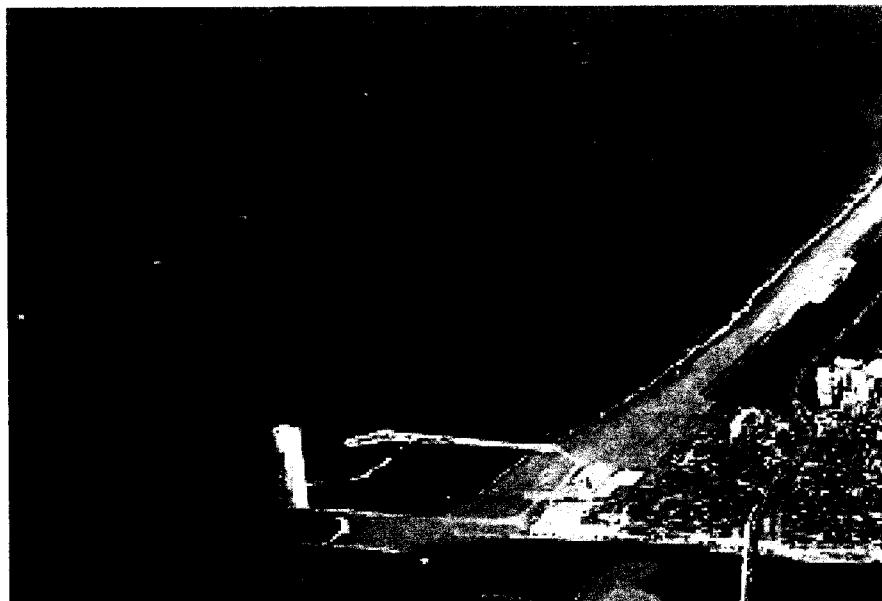
6.3.3. La déformée $\phi_1(z)$ du mode fondamental en flexion des bâtiments, tours et cheminée en console peut s'estimer comme suit :

$$\phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \quad (\text{A3.7})$$

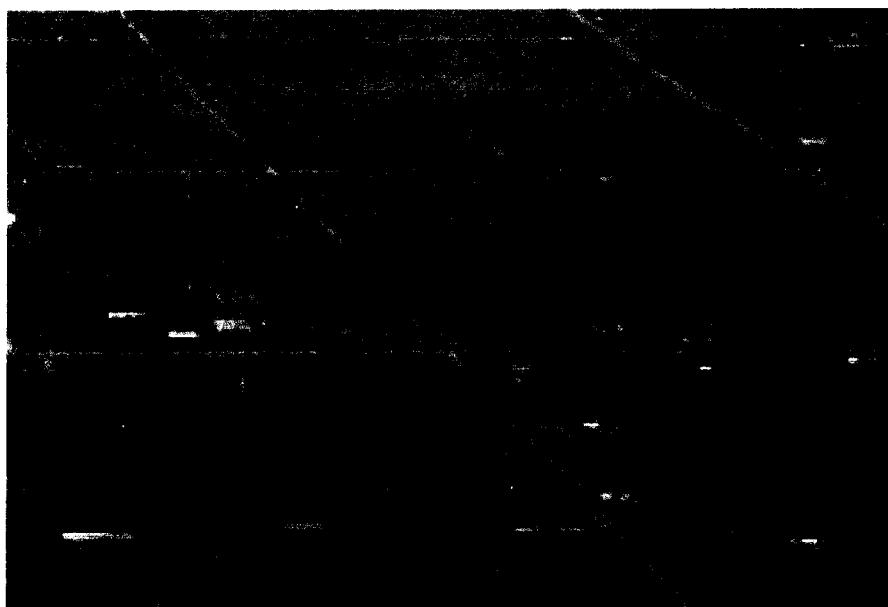
Où :

- h (en m) est la hauteur totale de la structure par rapport au sol ;
- z (en m) est la hauteur par rapport au sol du point considéré ;
- ξ est un coefficient :
 - $\xi = 1,0$ pour les bâtiments à noyau central et poteaux périphériques, ou pour les bâtiments à structure poteaux/poutres ;
 - $\xi = 1,5$ pour les bâtiments à noyau central et voiles périphériques ;
 - $\xi = 2,0$ pour les tours et cheminées ;
 - $\xi = 2,5$ pour les structures en treillis.

ANNEXE 4 : ILLUSTRATIONS DES CATEGORIES DE TERRAINS



Catégorie 0



Catégorie I



Catégorie I



Catégorie II



Catégorie III



Catégorie IV

ANNEXE 5 : SOUFFLERIES AERODYNAMIQUES

1. Introduction

Cette annexe a pour objet de fournir des informations utiles sur les essais de simulation des actions du vent sur des maquettes dans les laboratoires spécialisés. Elle s'adresse aux ingénieurs de structure, généralement non spécialistes dans ce domaine, mais qui sont des utilisateurs directs des résultats issus de ces essais, ce qui leur permettra d'exprimer des besoins bien précis et une utilisation correcte des conclusions.

2. Définition

Les souffleries sont des tunnels ronds ou rectangulaires dans lesquels le vent est produit par des ventilateurs, pour tester des objets fixes, (bâtiments ou autres structures, maquettes d'avion ou d'automobile, etc.).

L'objet immobile à tester est connecté à une instrumentation qui permet de mesurer les pressions et les forces exercées. On peut alors déterminer le comportement d'un bâtiment, ou les conditions de confort au vent d'un stade.

3. Conditions de similitude et restrictions associées

Lorsqu'on opère à échelle réduite, l'analyse dimensionnelle fait apparaître des nombres sans dimensions qui doivent être respectés pour que l'expérience en soufflerie soit équivalente à celle qui serait menée en vraie grandeur. En soufflerie, les nombres sans dimensions qui sont principalement utilisés sont le nombre de Reynolds et le nombre de Mach (rapport de la vitesse dans la veine d'essai à celle du son).

Si dans l'expérience, le nombre de Reynolds et le nombre de Mach sont les mêmes que sur le prototype, alors les écoulements sont similaires. Lorsque l'expérience est faite à échelle réduite en soufflerie, il est généralement impossible de satisfaire simultanément aux deux conditions et donc d'avoir une similitude parfaite. Cependant, à basse vitesse ($v < 100$ m/s), la compressibilité de l'air est négligée et l'on relaxe la condition de Mach. A l'inverse, la condition de Reynolds peut être écartée lorsque la vitesse du flux est suffisante pour que les effets de viscosité de l'air soient secondaires par rapport aux effets de l'inertie.

Dans tout essai à l'échelle réduite une analyse attentive des conditions de similitude est donc nécessaire pour s'assurer de la validité des résultats.

4. Types de souffleries

Il existe une gamme extrêmement étendue de souffleries, de la très petite à la très grande taille (veines d'essais de quelques décimètres carrés à plusieurs centaines de mètres carrés), avec des gammes de vitesses très variées. En fonction de ces caractéristiques, la conception et le domaine d'applications peuvent être très différents.

Une soufflerie est d'abord caractérisée par son diamètre utile et la vitesse du « vent » qui y est réalisable, mais il existe plusieurs architectures possibles.

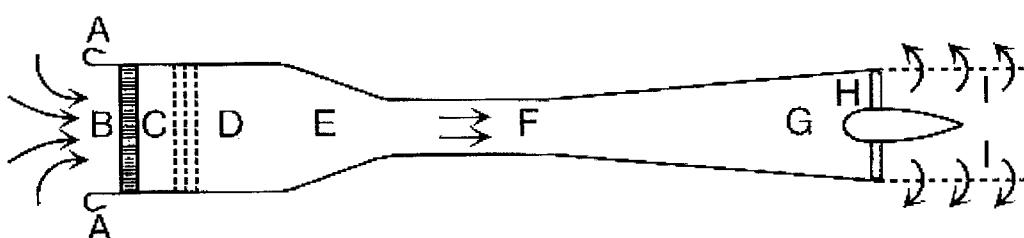
Une classification en fonction de la vitesse permet de distinguer les souffleries à basses vitesses (vitesses inférieures à 100 m/s dans la veine d'essai) où la compressibilité de l'air peut être négligée et les souffleries subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques où les écoulements sont en régime compressible et les vitesses comparables ou supérieures à celle du son.

Le champ d'application des souffleries basses vitesses est très large tandis que celui des souffleries en régime compressible est généralement réservé au domaine aéronautique et spatial.

5. Souffleries à basse vitesse et subsoniques

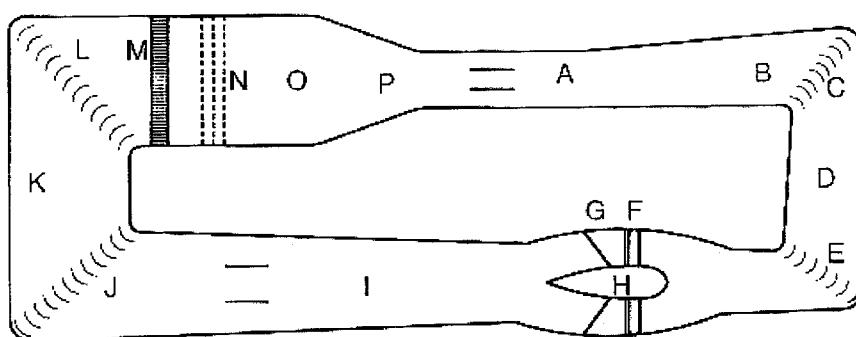
On distingue deux types principaux de souffleries ainsi que deux configurations de base de la veine d'essai :

- Soufflerie à circuit ouvert (figure A.5.1) : l'air est aspiré puis rejeté de la soufflerie dans un grand hall ou à l'extérieur ;
- Soufflerie à retour (figure A.5.2) où le retour est guidé, l'air restant constamment dans la soufflerie.



A : collecteur – B : nids d'abeilles – C : filets métalliques – D : chambre de tranquillisation
E : convergent – F : veine d'essais – G : diffuseur – H : ventilateur – I : répartiteur.

Figure A.5.1. Soufflerie à circuit ouvert et à veine guidée



A : veine d'essais – B : diffuseur – D, I, K : retour diffuseur – C, E, J, L : aubes de guidage
F : hélice – H, G : nacelle moteur et supports – M : nids d'abeilles – N : filets métalliques
O : chambre de tranquillisation – P : convergent.

Figure A.5.2. Soufflerie à retour et à veine guidée

Pour chacun de ces deux types, la veine d'essai peut soit être libre soit être guidée par des parois latérales guidant le flux dans la zone d'expérimentation.

La soufflerie conçue par Eiffel en 1912 est de type soufflerie à circuit ouvert à veine libre. Les souffleries modernes sont de type à retour et à veine guidée.

Les souffleries à veine ouverte (de type Eiffel) ont les avantages suivants :

- Coûts de construction bas ;
- Refroidissement naturel (les souffleries à boucle fermée réutilisant le même air doivent disposer d'échangeurs ou d'un système de refroidissement pour un fonctionnement à des vitesses élevées) ;
- Adaptées à l'étude des moteurs ou de la visualisation de la fumée puisqu'il n'y a pas d'accumulation de résidus dans l'air de la veine.

Et les inconvénients suivants :

- Le collecteur nécessite un dispositif de grille en nid d'abeille pour régulariser le flux d'air entrant, l'espace autour de la soufflerie doit être important afin d'éviter des dissymétries dues aux objets proches du collecteur. La qualité du flux des souffleries en boucle fermée est supérieure à condition de disposer des déflecteurs dans le tunnel de retour ;
- Si la prise d'air est externe, le vent et les conditions météo influencent le fonctionnement de la soufflerie ;
- Le cout d'exploitation est important puisque l'air doit être constamment accéléré ;
- Le fonctionnement est bruyant.

6. Domaine d'application

Les souffleries sont utilisées dans le domaine de :

- L'aéronautique, qui est le domaine privilégié. On y recherche des écoulements très uniformes et très peu turbulents correspondant aux conditions de vol en altitude ;
- L'automobile : utilisée pour tester des véhicules grandeur réelle avec des veines d'essai ou des chambres d'expérience rectangulaires de plusieurs dizaines de mètres carrés ;
- La simulation des conditions atmosphériques, en créant de la turbulence afin de reproduire à l'échelle réduite les caractéristiques de la turbulence atmosphérique, en utilisant des obstacles dans de longues veines rectangulaires formant rugosité répartie sur le sol. Ainsi on peut reproduire un type de vent à une échelle de réduction donnée. Ce type de soufflerie permet de traiter des problèmes de diffusion et de dispersion des polluants, et de charges locales et globales sur les ouvrages.

7. Conditions d'essais

Les essais en soufflerie, ou autres essais similaires employant des liquides autres que l'air, utilisés pour la détermination des charges de vent sur les bâtiments ou autres structures, doivent être effectués conformément aux dispositions de ce paragraphe. Les essais pour la détermination des forces moyennes et de la turbulence doivent satisfaire les conditions suivantes :

- La couche limite atmosphérique naturelle a été modélisée pour tenir compte de la variation de la vitesse du vent avec l'altitude ;
- Les échelles de turbulence intégrale (macro) et micro de la composante longitudinale de la turbulence atmosphérique sont modélisées approximativement à la même échelle que celle utilisée pour modéliser le bâtiment ou la structure ;
- Le bâtiment modélisé ou autre structure, structures environnantes et la topographie sont géométriquement similaires au bâtiment ou autre structure correspondant réelle, sauf que, pour les immeubles bas des essais sont permis pour le bâtiment modélisé dans un site à une seule exposition ;
- La surface projetée du bâtiment modélisé ou autres structures et le voisinage est moins de 8 % de l'aire transversale de la section de l'essai à moins qu'une correction soit apportée pour tenir compte du blocage ;
- Le gradient de pression longitudinale dans la section de l'essai de la soufflerie est pris en compte ;
- Les effets du nombre de Reynolds sur les pressions et les forces sont minimisés ;
- Les caractéristiques de réponse de l'instrumentation de la soufflerie sont compatibles avec les mesures nécessaires ;

8. Réponse dynamique

Des essais dans le but de déterminer la réponse dynamique d'un édifice ou toute autre structure doivent être réalisés. Le modèle structural et l'analyse qui lui est associée doivent tenir compte de l'amortissement, de la rigidité et de la distribution de masse.

9. Effets des charges

9.1. Durée d'occurrence des effets de charges

L'effet de la charge (la sollicitation) de dimensionnement est déterminé pour la même durée d'occurrence moyenne que la méthode analytique, en utilisant une méthode d'analyse rationnelle, définie dans la littérature reconnue, pour combiner les données de la soufflerie directionnelle avec les données météorologiques directionnelles ou modèles probabilistes basés sur ceux-ci. Pour les bâtiments sensibles aux variations de leurs paramètres dynamiques, des études de sensibilité doivent fournir un fondement rationnel pour les recommandations de conception.

9.2. Limitations des vitesses de vent

Les vitesses de vent et les estimations probabilistes sur lesquelles sont basées doivent être soumises aux limitations décrites dans le présent DTR.

9.3. Limitations des charges

Les charges totales sur le système de contreventement déterminées par des essais en soufflerie ne doivent être inférieures à 80 % de celles qui seraient obtenues par les méthodes analytiques.

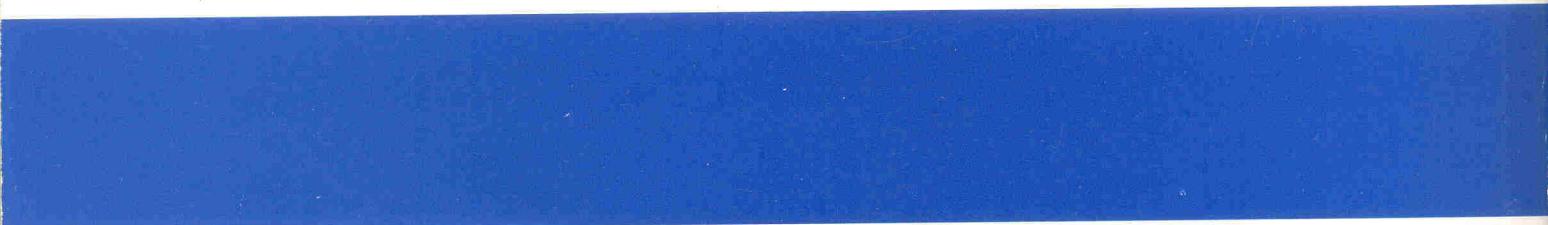
La charge globale principale doit être fondée sur le moment de renversement pour les bâtiments flexibles et l'effort tranchant à la base pour les autres bâtiments. Les pressions sur les composants et bardages déterminées par des essais en soufflerie sont au moins égales à 80 % des valeurs calculées pour la zone B pour les murs et la zone G pour les toitures à l'aide de la procédure du chapitre 5 § 5.1.1.

C.N.E.R.I.B.

Cité El-Mokrani - SOUIDANIA - ALGER

☎ (021) 38.00.79/89/90/91 Fax : (021) 38.04.31
Site web : www.cnerib.edu.dz ⓐ : mail@cnerib.edu.dz

PAO - CNERIB



Prix de vente : 450 DA

ISBN : 978-9961-845-47-9

